facultad de ingenieria

UNAM

APUNTES GEOLOGIA APLICADA

ING. JOSE MA. BOLIVAR

Departamento de Geología y Geotecnia.

N o t a

Los presentes apuntes de Geología Aplicada a la Ingeniería Civil constituyen mas que una obra original un trabajo de recopilación y síntesis de diversas obras de las cuales se han transcrito textualmente párrafos completos y copiado figuras, cuando se consideró necesario. Estas transcripciones fueron ampliadas, resumidas o modificadas a juicio del autor y algunos temas se elaboraron completamente.

Las obras mas utilizadas en estos apuntes son:

- Holmes, A., Geología para Ingenieros;

  Krynine, D. y Judd, W., Principios de Geología y Geotécnia para Ingenieros;

  Lahee, F. H., Geología Práctica;

  Legget, R., Geología para Ingenieros;

  Longwel, C. R y Flint, R. F., Geología Física.

El motivo de la ejecución de este trabajo ha sido el proporcionar a los estudiantes de Geología Aplicada a la Ingeniería Civil, una obra que se adapte al programa de la materia en la Facultad de Ingeniería de la UNAM., obra que hasta el momento no existia, lo que se piensa que redundará en una exposición mas clara y ordenada por parte del catedrático y una mejor oportunidad de estudio para el alumno.

Ing. José María Bolivar del Valle.

INDICE

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

INDICE DE TABLAS

I.- PRINCIPIOS BASICOS:

I.i.- LA TIERRA: La tierra se podría describir como una esfera rocosa (la litosfera), recubierta parcialmente por agua (la hidrosfera) y todo dentro de una envoltura gaseosa (la atmósfera).

ALGUNOS DATOS NUMERICOS SOBRE LA TIERRA

DIMENSIONES

	km.
Diámetro ecuatorial	12.757
Diámetro Polar	12.714
Longitud del ecuador	40.077
Longitud del meridiano	40.000

S U P E R F I C I E:

	Millones de kilómetros^2
Superficie del fondo del mar (70.78%)	361
Superficies de las tierras emergidas (29.22%)	149
Superficie total de la tierra	510

VOLUMENES, DENSIDAD Y MASA:

	$Km^3 \times 10^6$
Volumen	1,082.000
Densidad	5,527
Masa	5,876 trillones de toneladas

R E L I E V E :

	Metros
Mayor altura conocida (Monte Everest)	8,882 s/nivel del mar
Altura media de la Tierra	825 " " "
Nivel medio de la superficie (tierra y mar)	250 " " "

Nivel medio de la litosfera	2,450 debajo del niv. del mar.
Profundidad media del mar	3,800 " " "
Mayor profundidad conocida (Swire Deep)	10,480 " " "

A T M O S F E R A :

Está constituída por nitrógeno y oxígeno y, en menor proporción por vapor de agua, anídrido carbónico y algunos gases inhertes como el argón.

La atmósfera regula el clima, la temperatura, las lluvias, vientos, etc. de la superficie terrestre.

H I D R O S F E R A :

Recibe este nombre todo el conjunto de aguas naturales de la tierra, como los océanos, mares, ríos, lagos, aguas freáticas, etc., cubre las 3/4 partes de la superficie terrestre. Según R. L. Nace,(1958), las aguas terrestres se distribuyen del modo siguiente:

A.- Oceanos	97.39%
B.- Aguas Continentales:	
Casquetes polares y glaciares	1.83
Lagos de agua dulce	0.0093
Lagos de agua salina	0.0063
Promedio del gasto de los ríos	0.00002
Zona de raíces en los suelos	0.00094
Aguas subterráneas hasta 750 m	0.339

Aguas subterráneas entre 750 y 3 800 m de profundidad	0.424
C.- Aguas atmosféricas	0.0011

L I T O S F E R A :

Con este nombre se le conoce a la parte sólida de la tierra, constituída por una gran variedad de rocas. Recibe también el nombre de corteza terrestre y se le considera una profundidad promedio de alrededor de 50 km la litosfera; se ha subdividido en dos categorías principales, en función de su composición:

SIAL.- Son rocas claras como el granito, la granodiorita, etc.; tiene un peso específico promedio de 2.7, por lo que se puede considerar rocas ligeras. Son ricas en sílice y aluminio.

Este tipo de rocas son las predominantes en las áreas continentales.

SIMA: Son rocas obscuras como el basalto, la diobasa, etc., su peso específico promedio varía entre 2.9 y 3.4, por lo que se consideran rocas pesadas. Su composición es a base de sílice y magnesio. Este tipo de rocas predomina en los fondos oceánicos y se extiende por debajo de los continentes.

SUBSTRATO ó NIFE:

Está compuesto principalmente por niquel y fierro y se encuentra debajo de la litosfera, si bien hay autores que lo incluyen dentro de ésta, son rocas muy densas y que se supone se encuentran en estado plástico. Parece ser un material bastante uniforme en su composición y constituye el núcleo de la tierra.

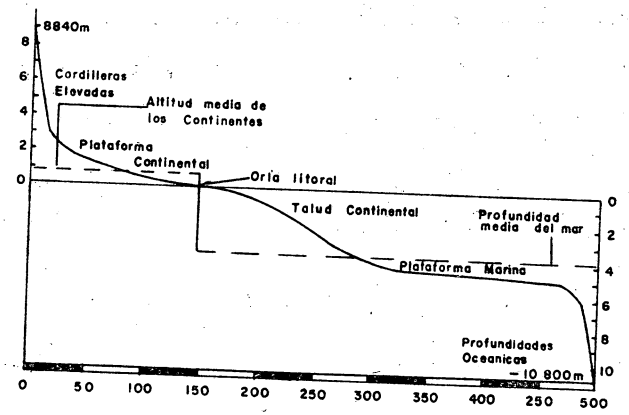


Fig. 1

CONTINENTES Y FONDOS OCEANICOS:

La superficie de la corteza alcanza profundidades muy diferentes en los distintos lugares. Se ha calculado la proporción entre las zonas terrestres y el fondo del mar para sucesivos niveles, y los resultados pueden representarse gráficamente como en la figura (1) . Del estudio de este diagrama se desprende con claridad que hay dos niveles dominantes La plataforma continental y la plataforma oceánica o de las profundidades marinas. El desnivel que las une, que en realidad es bastante suave, se llama talud continental.

La plataforma continental incluye un borde externo sumergido, conocido con el nombre de orla litoral, que se extiende más allá de la orilla, hasta una profundidad media de casi 100 ó 200 metros. Estructuralmente el comienzo de las verdaderas cuencas oceánicas debe considerarse, no en la línea de costa visible, sino en el borde de la orla litoral. Las cuencas, sin embargo, están muy repletas y el exceso de agua marina que desborda, llega a inundar cerca de 28 millones de kilómetros cuadrados de la plataforma continental. El mar del Norte, el Báltico y la bahía de Hudson, constituyen ejemplos de mares de aguas poco profundas, (mares epicontinentales o litorales) que yacen sobre la orla litoral. Es interesante hacer observar que durante la era de las glaciaciones, cuando fueron sustraídas enormes cantidades de agua de los océanos para formar las grandes capas de hielo que entonces cubrían a Europa y América del Norte, la mayor parte de la orla litoral debió de quedar en seco. Recíprocamente si se derritiera el hielo que cubre en la actualidad la Antártida y Groenlandia, se elevaría el nivel del mar y los continentes aparecerían aún más sumergidos.

Los continentes poseen un relieve muy variado formado por llanuras, mesetas y cordilleras, alcanzando estas últimas la altitud de 8,882 metros (Everest). Los fondos oceánicos, con algunas excepciones locales, se encuentran menos diversificados que los continentes, pero desde la superficie del fondo, en general monótona, en ellos se elevan islas, crestas y mesetas submarinas y se encuentran canales y profundas fosas por debajo del nivel medio del suelo oceánico. El sondeo más profundo realizado, es de 10.480 metros (Swire Deep, cerca de las Filipinas). La figura 1 pueda dar la impresión de que las profundidades mayores son las que se hallan más lejos de los continentes, pero no es cierto. Las fosas se hallan junto a los bordes continentales, y a lo largo de la costa asiática del Pacífico, se encuentran, en particular, muy desarrolladas.

De las cifras que hemos transcrito se deduce que el mayor desnivel registrado en la superficie de la litosfera, es sólo de algo más de 19 kilómetros.

Para comprender la verdadera relación entre las desigualdades del relieve de la superficie y las dimensiones de la misma Tierra, trácese una circunferencia de 5 cm de radio. Una línea fina de lápiz tiene un grosor de 1/4 de milímetro. Si 5 cm representan 6,367 kilómetros, entonces el grosor de la línea trazada representa 32 kilómetros. A esta escala, los accidentes del relieve están comprendidos por completo dentro del grosor de la línea de un lápiz.

FORMA DE LA TIERRA:

La forma esférica de la tierra quedó explicada cuando Newton descubrió la ley de la gravitación. Todas las partículas de la tierra son atraídas hacia el centro de gravedad, y la forma esférica es la reacción natural para alcanzar la máxima concentración posible. Aun cuando un cuerpo del tamaño de la tierra fuese más fuerte que el acero,no podría mantener una forma, como por ejemplo de un cubo. La presión ejercida por las masas situadas en aristas y vértices comprimiría el material. El equilibrio se alcanzaría solamente cuando las caras se hubieran incurvado convexamente, y las aristas y los vértices, se hubiesen hundido hasta que todas las partes de la superficie equidistaran del centro.

Sin embargo, la tierra no es exactamente esférica. Fué Newton el primero en demostrar que, a causa de la rotación de la tierra, su materia se encuentra afectada, no sólo por la gravitación interior, sino también por una fuerza centrífuga exterior que alcanza su máximo en el ecuador. Dedujo la existencia de un abombamiento, donde el valor aparente de la gravedad era más reducido, y en compensación, un achatamiento polar, en el que la fuerza centrífuga se iba desvaneciendo, hasta hacerse muy pequeña. Naturalmente, si ésto era así, la longitud de un grado de meridiano era más corta cerca del ecuador que alejándonos hacia el Norte. Para comprobar esta teoría fueron enviadas expediciones al Perú en 1735 y laponia en 1736 y fue confirmada la deducción de Newton. Si la superficie de la tierra estuviera en todas partes al nivel del mar, su forma sería muy aproximada a la de un elipsoide de revolución (o esferoide), de un radio polar de 6,356.39 kilómetros, casi 12 kilómetros más corto que el radio ecuatorial.

Pero, entonces¿ como es que la tierra no posee exactamente la forma de un esferoide?. La razón está en que las rocas de la corteza no tienen en todas partes la misma densidad. Como el abombamiento ecuatorial es una consecuencia del valor relativamente bajo de la gravedad alrededor de la zona ecuatorial, se deduce que habrá también abombamientos en los demás lugares donde la gravedad sea relativamente baja: es decir, donde la parte externa de la corteza se componga de ligeras rocas siálicas. Estos lugares son los continentes. En cambio, en donde la parte externa de la corteza se compone de rocas pesadas (sima), la superficie será, por consiguiente, deprimida. Estas regiones son las cuencas oceánicas.

La tierra está en equilibrio gravitatorio. Si no existieran la rotación ni ninguna diferencia lateral en la densidad de las rocas, la tierra sería una esfera. Como resultado de la rotación, se convierte en esferoide. Como consecuencia además, de las diferencias de densidad de las rocas de la corteza en los continentes, las cordilleras y las cuencas oceánicas, se producen irregularidades adicionales en la superficie del esferoide.

I S O S T A C I A :

El geólogo norteamericano Dutton propuso, en 1889, el término isostasia (del griego isostasis, -en equilibrio-), para designar la condición ideal de equilibrio gravitatorio que regula las alturas de los continentes y de los fondos oceánicos, de acuerdo con las densidades de sus rocas subyacentes. La idea puede comprenderse pensando en una serie de bloques de madera de pesos diferentes, que floten en el agua (fig. 2). Los bloques emergen en proporción a sus pesos respectivos; se dice de ellos que se encuentran en estado de equilibrio hidrostático. La isostasia es el correspondiente estado de equilibrio que existe entre extensos bloques de la corteza terrestre que se elevan a niveles diferentes y se manifiesta en la superficie con la forma de cordilleras, vastas mesetas o llanuras.

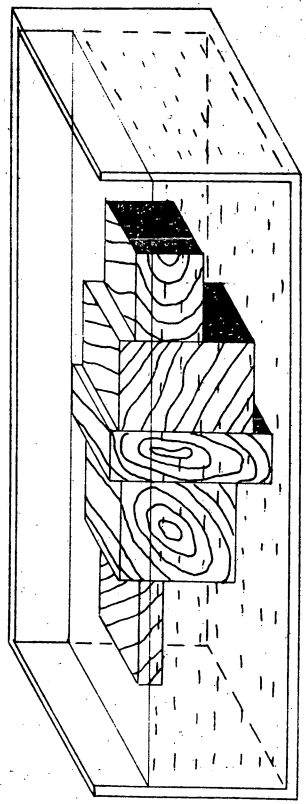


Fig. 2

Naturalmente, cada una de las cumbres y de los valles no se equilibran por separado en este sentido; los rasgos menores del relieve de la superficie son conservados fácilmente por la resistencia de las rocas de la corteza.

Si una cordillera fuera simplemente una protuberancia de rocas que descansan sobre la plataforma continental, y totalmente sostenidas por la resistencia de la base, una plomada -como las que se usan en los instrumentos para la nivelación, en el levantamiento de planos-, se desviaría de la verdadera vertical en una magnitud proporcional a la atracción gravitatoria de la masa de la cordillera. La primera insinuación de que las montañas no son simples masas adheridas a la corteza fué proporcionada por la expedición enviada al Perú en 1735. Bouguer halló que la desviación de la plomada en los Andes era sorprendentemente pequeña, y expresó su sospecha de que la acción de la gravedad en los Andes -es mucho mas pequeña de lo que era de esperar, dada la masa representada por estas montañas-. Se encontraton discrepancias similares durante el levantamiento del mapa topográfico de las tierras bajas de la India, situadas al sur del Himalaya. La atracción de las enormes masas del Tibet y del Himalaya fué estimada suficiente para desviar la plomada, al menos, en 15 segundos de arco, pero la desviación real hallada en el Everest, fué solamente de 5 segundos de arco. Aún más notable fué la observación de que a lo largo de la costa española del golfo de Vizcaya, la plomada se desviaba hacia el golfo, en vez de hacerlo hacia la cordillera Cantábrica.

Solamente es posible una explicación física de estas discrepancias. Debe de haber un déficit de masa en los bloques de la corteza que están debajo de las cordilleras visibles, es decir, la densidad de las rocas debe ser relativamente baja a profundidades considerables. Las posibles distribuciones de densidad, son, por supuesto, infinitas. Afortunadamente conocemos algo de las rocas del interior de la corteza y podemos ver cuales son las posibles densidades. Además pueden usarse las ondas sísmicas para explorar las profundidades y los datos que proporciona esta fuente de infrmación, indican que las cordilleras tienen raíces siálicas que descienden hasta profundidades de 40 kilómetros o más; que debajo de las llanuras situadas cerca del nivel del mar, el espesor de sial es sólo de 10 a 12 kilómetros y que, debajo del fondo oceánico, el sial está casi ausente, o es muy delgado.

I.ii EL TIEMPO EN GEOLOGIA, FOSILES, RADIACTIVIDAD:

Ultimamente se han desarrollado nuevas técnicas para la datación de las edades de las rocas, basadas en la radiactividad, la cual produce desintegraciones que tienen efecto con ritmo constante.

El principio de estos métodos es simple. Supongamos que un cuerpo radiactivo -A-, existiése sólo, es decir, sin sus descendientes en el momento de formación de un mineral. El descendiente final de -A-. será el mineral estable -B- que en ese momento aun no existe.

Desde el momento de su formación, el cuerpo -A- comienza a desintegrarse o por una serie de intermediarios origina el cuerpo -B-, o sea que la cantidad de -A- va disminuyendo y la de -B- aumentando, conforme pasa el tiempo.(fig. 3). Evidentemente es entonces posible si se conocen las leyes de la desintegración, fijar la época de formación del cristal y por consiguiente, la de la roca que lo contenga si el mineral es uno de sus constituyentes primarios.

El problema no siempre es tan sencillo como puede parecer hasta el momento, pues el mineral -B- puede existir ya en el momento de la cristalización, y la cantidad de -B-, medida en la actualidad, representa la suma de la cantidad inicial, más la reproducida por desintegración. En este caso será necesario hacer una corrección.

Existen numerosos métodos de datación radiactiva, pero un método que puede ser útil para una roca dada, puede ser mediocre o inutil en otra, por lo que se deberán conocer las ventajas y desventajas de cada uno. Por otra parte, siempre que sea posible, los resultados se deberán confirmar por otros medios.

Los métodos más comúnes debido a su mayor facilidad de aplicación son: el método de los halos pleocroicos, método del helio, método del plomo total, método del plomo alfa, método de los plomos isotopicos,

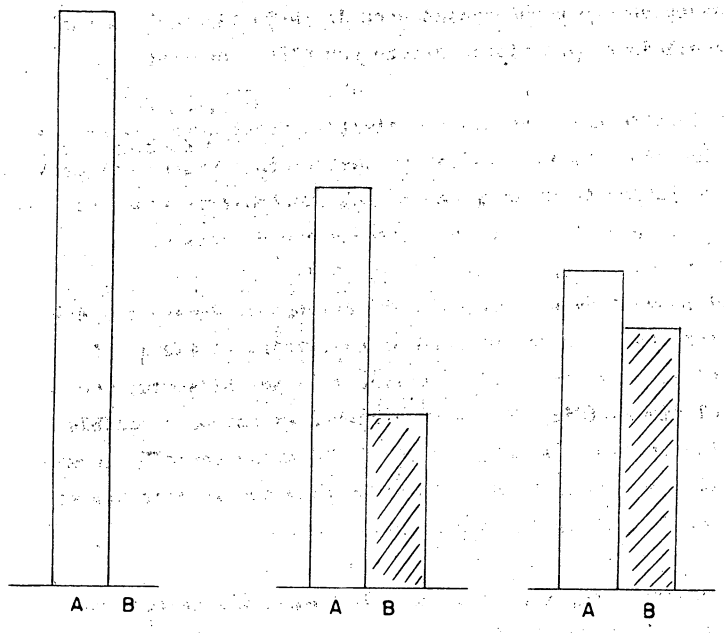


Fig. 3

método del estroncio, método del carbono 14.

La posibilidad de obtener la edad de las rocas por alguno de los métodos anteriores, ha conducido necesariamente a tratar de determinar la edad de la tierra, o más bien, la edad de la corteza terrestre: se han obtenido varios resultados que reportan mayores edades, cuanto mejor se han ido seleccionando las muestras y se afinan las técnicas. Las medidas más recientes le asignan a nuestro planeta una edad cercana a 5.3 y 5.5 x 10^9 años.

Dando por hecho que podemos obtener la edad absoluta de una roca, se puede saber a partir de ella de las adyacentes, a base de correlaciones que se pueden extender a distancias más o menos grandes.

El criterio de correlación más importante lo constituyen los fósiles, que son restos de horganismos o sus impresiones, los cuales fueron sepultados en condiciones tales que permitieron su conservación hasta el momento actual.

En función de su aplicación práctica, los fósiles se pueden dividir en dos grandes grupos.

a).- Fósiles de facíes, que indican un medio ambiente determinado, como por ejemplo los corales que viven en aguas someras y cálidas, los saurios, etc.

b).- Fósiles característicos que son aquellos que en vida tuvieron gran extensión horizontal y poca extensión vertical, o sea una gran difusión geográfica, pero siendo un género o especie, cuya existencia fue corta geológicamente hablando. Estos fósiles característicos son los útiles para establecer correlaciones, pues su presencia en una roca nos indicará una determinada edad, que será la misma para cualquier lugar donde aparezca.

Una vez establecida la presencia de uno o más fósiles característicos en las localidades que se pretende correlacionar el criterio paleontológico, se apoyará en el litológico para establecer una correlación litoestratigráfica, como se ilustra en la figura No. 4 en la que aparecen las columnas estratigráficas de tres localidades y sus correlaciones.

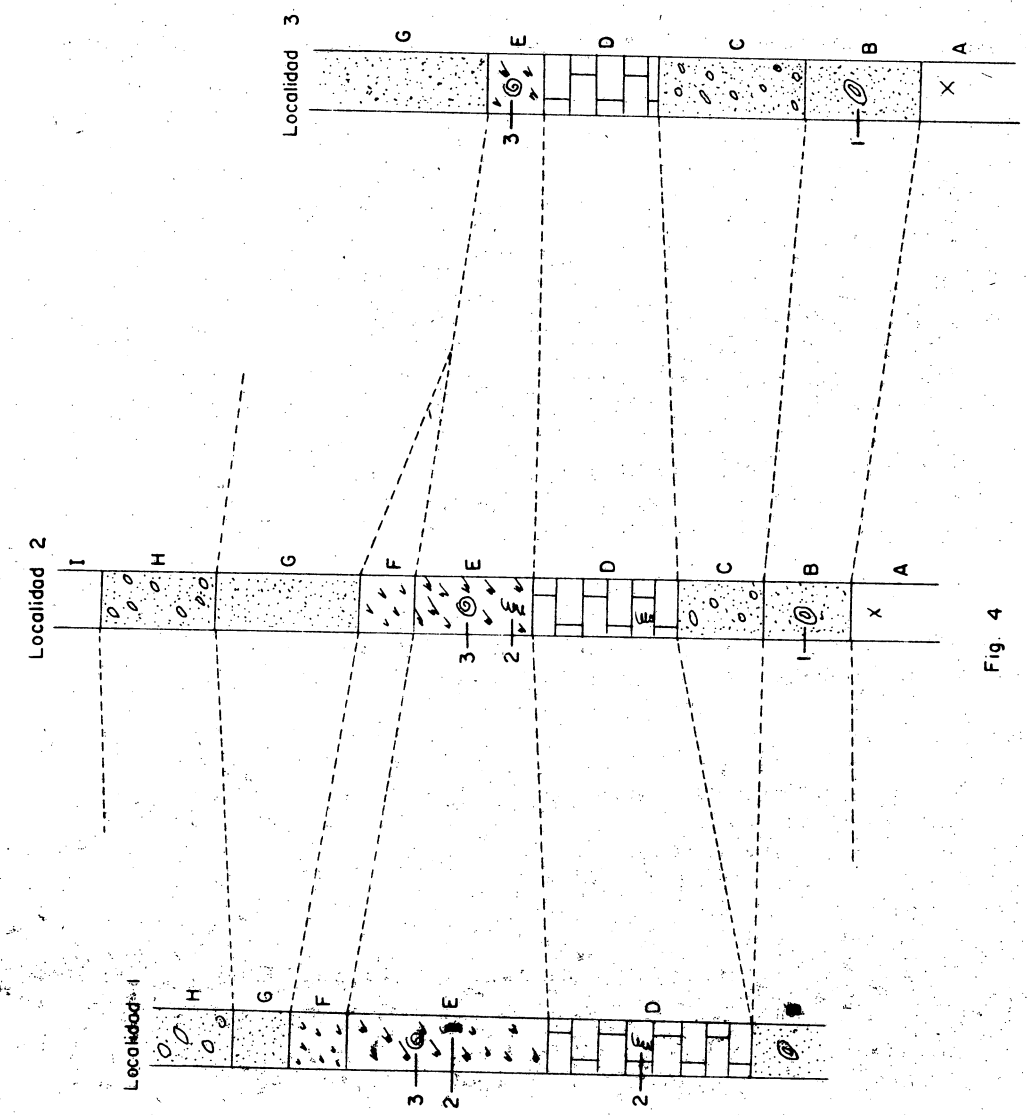


Fig. 4

La formación más antigua es el granito -A-, al cual se le hizo una determinación de plomo/alfa que, reportó una edad de 700 millones de años, lo que lo sitúa en el Precámbrico, por similitud litológica, se correlacionó con el de la localidad 3. Sobre -A- se encontró en las localidades 2 y 3 a la arenisca -B-, que aparece también en la localidad 1, la cual contiene al fósil 1 que es un trílobites característico del Cámbrico· así podemos correlacionar a -B- en las tres localidades, tanto por su litología como por su edad y por su posición relativa, con respecto a las formaciones infra y suprayacentes; además sabemos que se depositó en un ambiente marino, pues los trilobiles vivieron en el mar.

Sobre -B- se depositó el conglomerado -C- que no aparece en la localidad 1, debido probablemente a que la profundidad del agua era mayor en ese lugar. Sobre C y B se acumuló la caliza -D- en la que aparece el fósil 2, que no es característico, por lo que la correlación se hizo solo en base a la litología. Inmediatamente arriba de -D-, se encuentran unas lutitas que contienen fósiles del género 2 y 3,estos últimos son una especia de Ammonites característicos del cretácico superior, con lo que podemos saber la edad de la roca y establecer entre las tres zonas una correlación litoestratigráfica.

Sobre -E-, aparece en las localidades 1 y 2 la riolita -F- y vemos que el vulcanismo no ocurrió en la localidad 3.

Sobreyaciendo a E y F, aparecen las arkosas de -G- que se correlacionan por su litología y que nos indican una retirada de las aguas marinas, puesto que son rocas continentales.

Sobre -G- yace el conglomerado _H_ constituído por clastos de caliza ,riolita y arkosa, lo que nos indica un período de erosión que afecta a casi toda la columna. El hecho de que en la localidad 3 no aparezca, puede deberse a que no se depositó o bien ya fue erosionado

En la localidad 2 aparece descansando sobre el conglomerado ,una serie de lutitas y arcillas en las que se encuentra el fósil 4,consistente en restos de Mamuts característicos del cuaternario. Esta unidad no se puede correlacionar con las otras localidades.

En la tabla No. 1, aparecen las principales épocas geológicas y sus duraciones.

TABLA No. 1

CUADRO DE CORRELACION ESTRATIGRAFICA

ERA	SISTEMA	SERIE		PISO EUROPEO		EDAD M.A.
CENOZOICA	Cuaternario	Reciente				
		Pleistoceno				0.6
	Terciario	Plioceno				12
		Mioceno				25
		Oligoceno				40
		Eoceno				60
		Paleoceno				70
MESOZOICO	Cretácico	Superior	Colfiano	Maestrichtiano		
				Seno-niano	Campaniano	
					Santoniano	
					Coniaciano	
				Turoniano		85
			Comanchiano	Cenomaniano		
		Inferior		Albiano	Superior	
					Medio	
					Inferior	
				Aptiano		100
			Coahiliano	Neocomiano.	Barrémiano	
					Hauteriviano	
					Valanginiano	
					Berriasiano	135
	Jurásico	Superior		Tithoniano		
				Portlandiano		
				Kimmeridgiano		
				Oxfordiano		
				Calloviano		
		Medio		Batoniano		
				Bajociano		
				Aalenjano		
		Inferior		Liasico	Toarciano	
					Pliensbachiano	
					Sinemuriano	
					Hettangiano	180
	Triasico	Superior				
		Medio				
		Inferior				220
	Permico					310
	Carbonifero	Pensilviano				
		Misisipiano				350
	Devonico					400
	Silurico					440
	Ordovicico					500
	Cambrico					600

II.- MINERALOGIA Y PETROGRAFIA:

II.1.- Elementos de Mineralogía.

Mineral.- Es una substancia inorgánica natural de composición química y física definidas.

En la práctica ingenieril se identifican las rocas y minerales, mediante métodos megascópicos. Los minerales y rocas complejos pueden exigir láminas delgadas o análisis más complejos.

Propiedades físicas de los minerales: Color y Raya

Existen tablas de colores. Hay que cuidar que la superficie esté fresca. Hay minerales que tienen una amplia gama de colores.

Dureza:

Se determina por comparación con la tabla de dureza Mohs.

1.- Talco.- Marca los tejidos
2.- Yeso.- Puede ser arañado con la uña
3.- Calcita.- Puede ser rayada por una moneda de Cu.
4.- Fluirita
5.- Apatita. Puede ser rayada con navaja
6.- Ortoclasa. Raya los cristales de ventanas
7.- Cuarzo.- No lo raya el acero
8.- Topacio
9.- Zafiro.- Raya la mayor parte de los metales
10.- Diamante. Raya cualquier material excepto a otro diamante.

Tenacidad:

Es la capacidad de un mineral para resistir presiones, desgarre o tensión.

A este respecto, los minerales pueden clasificarse:

1.- Quebradizos.- Saltan en fragmentos y son fáciles de pulverizar.
2.- Maleables. Que a base de golpes de martillo pueden reducirse a láminas delgadas.
3.- Sectil. Que pueden cortarse en láminas delgadas.
4.- Dúctil. Puede estirarse en forma de hilo.
5.- Flexible. Puede ser doblado pero no recupera su forma original
6.- Elástico. Puede doblarse y recupera su forma original al cesar la fuerza.

Forma Cristalina:

Los minerales pueden ser amórfos o cristalinos.

Los cristales tienen formas limitadas por caras o planos y pertenecen a un sistema cristalográfico determinado, que se caracteriza por sus ejes cristalográficos (a.b.c.), perpendicular entre si y que correspondan commmente a los ejes de simetría del mineral.

Peso específico o densidad:

Es la relación existente entre la masa de un determinado volumen de un material y la masa de un volumen igual de agua a la temperatura de 4°C.

Brillo:

Es la apariencia de un mineral a la luz reflejada. Pueden ser metálicos o no metálicos. Los no metálicos se dividen en:

1.- Vítreo. Con apariencia de vidrio.
2.- Graso.- Con aspecto graso o aceitosos
3.- Diamantino.- Con el brillo seco del diamante
4.- Perlado.- Con el aspecto iridiscente de las perlas
5.- Sedoso.- Parecido a la seda.
6.- Resinoso.- Como la resina.

CUADRO 1-2. PROPIEDADES DE LOS MINERALES

Subdivisión química	Nombre	Color	Dureza	Fractura y tenacidad	Brillo	Raya	Forma Cristalina	Peso Específico	Composición Química
	Clorita	Verde	2-2.5	No elástica, laminar	Perlado	Verde pálida o blanca	Monoclínica	2.7	Hidrosilicatos de Alcón hierro ferroso Mg
	Feldespato	Incoloro, blanco, rojizo amarillento (si es impuro)	6	Desigual, subconcoidea. Quebradizo	Vítreo con exfoliación. Quebradizo	Blanca	Monoclínica ó Triclínica. Maclas frecuentes.	2,54-2,76	Si_3O_8Kal Si_3O_8NaAl a $Si_2O_8CaAl_2$
	Hornablenda Puede diferenciarse del piroxeno, sólo cuando se presenta como cristales largos, aciculares y + difíciles de exfoliar								
	Caolinita	Blanco, Tonos de amarillo a pardo		Para su identificación son necesarios, el microscopio ó los rayos X.			Monoclínica	Exige el microscopio ó la difracción de rayos X para su identificación	
	Micas	Blanco (moscovita), negro (biotita, coloraciones impuras	2-3	Desigual-Flexibles (elásticas)	Vítreo ó Sedoso		Monoclínica A menudo como tablillas aplastadas de 6 lados	2,76-3,2	$(SiO_4)_3Al(MgFe)_2$ KH_3 (biotita) $(SiO_4)_3Al_3KH_2$ (moscovita)
Silicatos	Olivina		6,5-7		Vítreo	Sólo reconocible si se encuentra en fenocrístales. Es corriente en las rocas oscuras			
	Piroxenas	Blanco-verde-negro	5-7	Desigual. Quebradizos	Vítreo a perlado	Blanca a gris verde	Monoclínica a ortorrómbica	3,2-3,6	Mg,Fe,Ca-Mg. Ca-Fe,Na-Fe. Al-Fe, y Li-Al Oxidos y silicatos
	Talco	Blanco a blanco verdoso	1	Blanco, tacto untuoso, como de jabón. Hojoso. Compacto.	Plateado a graso	Blanca a blanco verdosa	Monoclínica	2,7-2,8	$(SiO_3)_4Mg_3H_2$
	Serpentina	Verdoso por lo general en variados tonos	2-5	A menudo fibrosa a compacta. Laminar.	Graso-compacto.		Monoclínica no se conocen cristales.	2,2-2,7	$Si_2O_9Mg_3H_4$
	Zeolitas		31/2-5 1/2		Vítreo	Incolora a blanca	Por lo general exige para su identificación el empleo de métodos petrográficos.	2,0-2,4	Na,Al y óxidos de Si, y, a veces, Ca y H_2O
	Corindón	Tonalidades de gris azul	9	Quebradizo a tenaz	Diamantino vítreo a apagado y graso.		Hexagonal	4	Al_2O_3
	Hematíes	Gris a negro	5,5-6,5	Laminar (subconcoidea (no exfolia)	Metálico a apagado	Roja	Hexagonal (romboédrica)	5,2	Fe_2O_3
	Ilmenita	Rojizo a netro parduzco	5-6	Concoidea. Quebradizo (no exfolia)	Submetálico	Negra a roja parduzca	Hexagonal	4,5-5	TiO_3Fe
Oxidos	Limonita	Pardo a pardo amarillento	5-5,5		Apagado a submetálico	Pardo-amarillenta	Amorfa. Masas terrosas o concrecionadas.	3-6-4,0	Fe_2O_3H2O
	Magnetita	Gris oscuro a negro	5,5-6,5	Desigual, quebradiza (exfoliación pobre)	Metálico		Isométrica	5,2	Fe_3O_4
	Cuarzo	Blanco, gris negro, rosa	7	Concoidea, desigual, astillosa Quebradizo a tenaz	Aceitoso a vítreo	Blanca	Hexagonal	2,65	SiO_2
	Calcita	Incoloro o blanco, pero puede estar manchado	3		Vítreo. Apagado si es compacta.	Incolora o blanca	Romboédrica	2,71	Co_3Ca
Carbonatos	Dolomía	Blanco o multicolor	3,5-4		Vítreo a perlado y apagado		Romboédrica (rara en forma de cristal)	2,8-2,9	$(CO_3)_2CaMg$
	Anhidrita	Blanco, pero a veces manchado	3-3,5	Hojoso. Concoidea	Perlado, vítreo Apagado-compacto		Ortorrómbica Más frecuentemente de granular a masas compactas	2,95	SO_4Ca
Sulfatos	Yeso	Incoloro a blanco. Puede definirse de varios colores	1,5-2		Vítreo, blanco, perlado. Fibroso. Apagado compacto		Monoclínicas Maclas frecuentes	2,32	$So_4Ca\ 2H_2O$

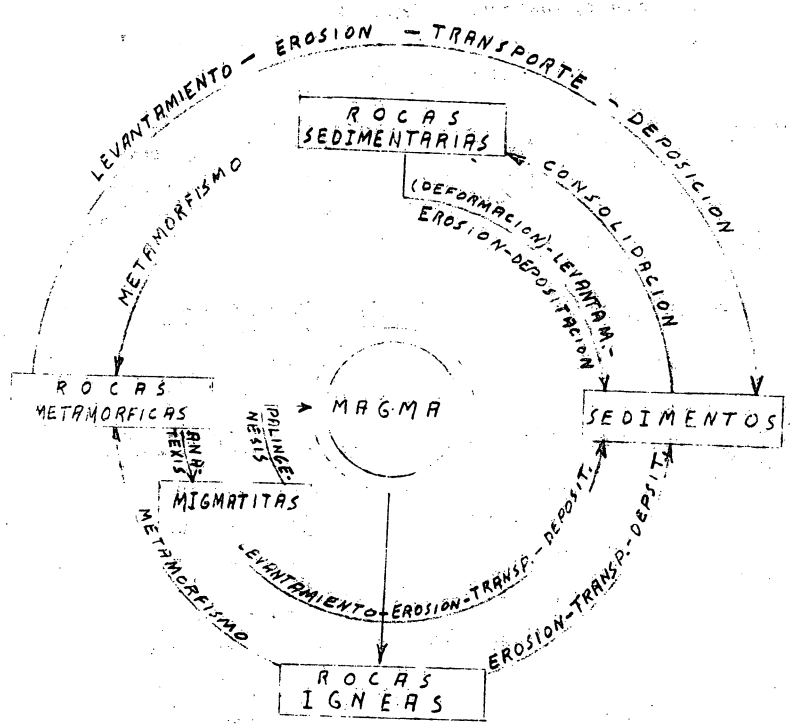


Fig. 5 Ciclo de formación [illegible]

Capacidad de transmisión de la luz (diafanidad)

Se divide en:

1.- Transparente.- Permite el paso de la luz y se ven las imágenes
2.- Translúcido.- Pasa la luz, pero no la imagen.
3.- Opaco.- No trasmite la luz.

II.ii.- ELEMENTOS DE PETROGRAFIA: ROCAS IGNEAS:

RIOLITA - GRANITO: Cuarzo 10-40%, Feldespato potásico 30-60%, Plagioclasa, sódica (excepto pertita) 0-35%, Máficos (biotita, hornblenda) 35-10%.

Si la plagioclasa es más abundante que el feldespato potásico, la roca se llama -Granodiorita-.

Si disminuye el contenido de cuarzo, la roca se llama -Sienita-

La obsidiana es vidrio riolítico y la perlita es obsidiana hidratada

DACITA - GRANODIORITA. Feldespato potásico 20-40%, Plagioclasa sódica 25-45%. Cuarzo 35-10%, Maficos (biotita, hornblenda) 30-10%.

Si la plagioclasa es mineral accesorio, la roca pasa a clasificarse como-tonalita-.

TRAQUITA-SIENITA. Feldespato potásico 30-80%, Plagioclasa sódica 5-25% Maficos (biotita, anfíbola y piroxenas) 40-10%

LATITA MONZONITA. Maficos (biotita hornblenda, augita) 15-60%. Plagioclasa sódica (andesina oligoclasa), 50-30%. Feldespato potásico, por lo general ortoclasa) 45-20%

DACITA-TONALITA. Plagioclasa sódica (oligoclasa o andesina) 50-80%, Cuarzo 35-10% Maficos (biotita) y hornblenda principalmente 35-10%.

ANDESITA - DIORITA Plagioclasa (oligoclasa o andesina) 55-70%, Maficos (por lo general hornblenda ó biotita) 45-25%

BASALTO - GABRO. Máficos (Augita, hiperstena u olivino, menos frecuente hornblenda) 25-50%. Plagioclasa (labradorita o bylownita) 70-45%.

PERIDOTITAS: Máficos (olivino, piroxeno, hornblenda) 85-95%. Minerales metálicos (magnetita, ilmenita, cromita, etc.) 10-3%. Plagioclasa cálcica, menos de 5%.

PROPIEDADES Y USOS DE LAS ROCAS IGNEAS:

RIOLITA: Resistente a la compresión, se emplea en empedrados y en balastros, a veces como piedra ornamental.

GRANITO: Resistente a la compresión, (1500 kg/cm^2). Resistente al intemperismo, sobre todo después de pulido. Poco resistente a los cambios bruscos de temperatura.

Se emplea en caminos adoquinados, cordones de aceros, lajas, balasto, en ciertos casos cuando es porfídico, como piedra ornamental, para construcción en general. Cuando puede partirse en bloques como pedestal de monumentos.

TRAQUITA. Poca resistencia a la compresión (600 kg/cm^2), pero puede servir como piedra de construcción y a veces en revestimientos.

El material piroclastico puede servir para obtener puzolanas.

SIENITA. Semejante al granito en sus usos.

ANDESITA Y DIORITA. Construcción en general.

BASALTO: Ornamentación, empedrado y construcción. Resistente a la compresión, llega a 5000 kg/cm^2, es fácil de explotar, pues rompe en bloques.

GABRO. Usos semejantes al granito

ROCAS PIROCLASTICAS. Estan formadas por material detrítico expulsado por la chimenea volcánica, transportados por aire y depositados en la superficie del suelo, en lagos o en el mar.

CLASIFICACION, TOMANDO EN CUENTA EL TAMAÑO Y FORMA DE LOS GRANOS:

Tamaño del grano en mm.	No consolidadas	Consolidadas
Mayor de 32	Bombas	Aglomerados
	Bloques (angulosos)	Brechas volcánicas
	Bloques y cenizas	Brechas tobaceas
Menor de 32 y mayor de 4	Lapilli	Tobas de lapilli
	Cenizas (vesiculares)	Tobas cineriticas de lapilli
Menor de 4 y mayor de 1/4	Cenizas gruesas	Tobas gruesas
Menor de 1/4	Cenizas o polvo volcánico	Tobas

CLASIFICACION EN BASE A LA NATURALEZA DE LAS PARTICULAS:

1.- Vítreas.- Cuando predomina el vidrio
2.- Líticas.- En las que predominan los fragmentos de roca.
3.- Cristalinas. En laq que predominan los cristales y fragmentos de cristal.

Si existen cristales identificables y una asociación clara con un tipo de roca, la toba puede clasificarse como toba riolítica, andesítica, etc.

UTILIDAD EN INGENIERIA:

Algunas, cuando están bien compactadas, pueden servir para construcción, como por ejemplo el Palacio de Minería, construido con una toba andesítica.

ROCAS SEDIMENTARIAS:

Las rocas sedimentarias pueden ser de tres distintos orígenes:

Mecánico
Químico
Orgánico

ROCAS SEDIMENTARIAS DE ORIGEN MECANICO:

Se clasifican tomando en cuenta la granulometría y en forma simplificada en:

Tamaño del grano en mm.	No consolidadas	Consolidadas
Mayor de 2	gravas (redondeadas)	Conglomerados
	Gravas (angulosas)	Brechas
Menor de 2 y mayor de 0.1	Arenas	areniscas
Menor de 0.1	limos y arcillas	lutitas y rocas arcillosas.

CONGLOMERADOS:

Contienen como mínimo un 10% de fragmentos gruesos redondeados, lo cual indica un transporte mas o menos largo antes de su depósito.

El transporte se realiza por medio de agua, principalmente aguas marinas someras y ríos. Los intersticios entre las gravas, generalmente se rellenan con materiales mas finos (generalmente arenas y limos) y si las aguas transportan y precipitan sílice, carbonato de calcio y óxidos de hierro, estos materiales actúan como cementante de los fragmentos detríticos.

En función de la naturaleza de los clastos, los conglomerados se pueden dividir en:

OLIGOMICTICOS. Con detritos de una sola composición procedentes por lo tanto de una misma fuente de material.

POLIMICTICOS. En los cuales los detritos son de varias composiciones diferentes.

B R E C H A S :

La proporción de gruesos es semejante a la de los conglomerados y la forma angulosa es indicativa de poco transporte.

Las brechas pueden dividirse en:

BRECHAS DE TALUD. Consistentes en la acumulación de fragmentos angulosos caídos por gravedad en la base de escarpes de fuertes pendientes.

BRECHAS VOLCANICAS. Como su nombre lo indica se deben a la actividad volcánica, principalmente por la acumulación del material expulsado por el volcán

BRECHAS DE INTRUSION. Que aparece en el contacto de algunos cuerpos intrusivos con la roca encajonante.

BRECHAS DE FALLA O TECTONICAS. Aparecen en las zonas de falla, debido al rozamiento de las masas pétreas desplazadas por la falla

A R E N I S C A S :

Las areniscas pueden dividirse según sus conssituyentes en:

ARENISCAS CUARCIFERAS: Son por lo general indicativas de un transporte largo que ha eliminado los materiales más blandos, o bien de varios ciclos de sedimentación y erosión.

Están constituídas por granos de cuarzo bien clasificados y redondeados, unidos por un cementante químico.

La buena esfericidad de los granos y la ausencia de impurezas, hace que la superficie de contacto entre grano y grano, sea mínima y resulta así cuando no está bien cementada, una roca de alta permeabilidad.

La permeabilidad puede ser alta también si el cementante es carbonato de calcio, soluble en agua. Si el cementante es Sílice, la arenisca recibe el nombre de -Cuarcita-. Es una roca bien compactada y prácticamente impermeable.

ARCOSA O ARENISCA ARCOSICA. Resultan de la cementación de arenas procedentes de rocas ígneas ácidas. Son ricas en feldespatos (25% ó +), son de color claro, por lo general continentales y resultan de la erosión de macizos graníticos o gneisicos. Son rocas mal clasificadas por lo general, lo cual permite su compactación, pues los espacios interticiales se rellenan con granos finos.

Los granos están poco redondeados y al compactarse resulta un entrecruzamiento de granos que al cementarse da por resultado una roca fuerte y compacta.

GRAUVACAS. Están constituídas por materiales detríticos de origen marino, son de color gris oscuro a negruzco, con matríz arcilloza, raramente calcárea. Se encuentra en ellas elementos volcánicos y son índice de movimientos orogénicos importantes. Se caracterizan por la gran variedad de origen de la fracción detrítica. Son rocas mal clasificadas y con detritus de redondeamiento variable.

Es característico el que los granos presentan corrosiones en la periferia, produciéndose un entrecruzamiento de los granos que da lugar a una roca soldada en la que el cementante no es importante.

SUBGRAUVACAS. Son rocas intermedias entre las grauvacas y las areniscas cuarcíferas. Están moderadamente cementadas y se caracterízan por un porcentaje elevado de arcilla y sílice.

Predominan en ellas los granos astillados, angulosos, de cuarzo, formando un conjunto poco entrelazado en cuyos poros se ha depositado arcilla. Tienen como constituyentes secundarios, fragmentos de roca, feldespato, etc.

PROPIEDADES Y USOS DE LAS ARENISCAS.

La resistencia a la compresión varía en promedio entre 360 y 940 kg/cm^2, pero es muy variable dependiendo de la naturaleza y cantidad de cementante, por ejemplo una cuarcita tiene una resistencia mucho mayor, en cambio si el cementante es débil, puede ser mucho menor.

Porosidad y permeabilidad: En general, son rocas porosas a excepción de las cuarcitas. El volumen de huecos vacíos varía en promedio entre 2y25%, dependiendo la permeabilidad de la comunicación entre esos poros.

Es buen material de construcción, pero depende mucho del cementante. Se usan para interiores y exteriores de edificios, para pilares, muros, construcción de presas, puentes y muros de contención. Si están bien cementadas se usan también como piedra de triturado.

Lutitas y rocas arcillosas: Los constituyentes principales son los minerales arcillosos (0.001)mm, con sericita y sílice. En reneral, resultan de la compactación y consolidación de arcillas que han sufrido transporte y se han depositado en mares, lagos, pantános o en el curso bajo de una corriente.

En la transición entre la arcilla y la roca, hay una gran variedad de compactaciones. Se puede considerar roca arcillosa o lutita, aquellas que al sumergirse en agua conservan su cohesión y como arcillas aquellas que se separan.

En su consolidación, tiene poca importancia la cementación a causa de lo fino de las partículas y a que es impermeable.

La consolidación se debe a los coloides y a la fuerza de atracción superficial, ayudados por la cristalización del sílice y la mica.

Propiedades y usos.- No son rocas adecuadas para la construcción, pues son blandas y al humedecerse generalmente pierden consistencia, además, al someterse a una carga, pueden escurrir . Por lo anterior, si se va a cimentar una construcción en ellas, deben ser sometidas a pruebas en estado húmedo y seco.

Se utilizan en los caolines puros, luego de añadirles un poco de feldespato y fundiéndolos producen porcelana. Las montmorillonitas son absorventes y decolorantes y sirven para desengrasar lanas y refinar aceites.

La bentonita se emplea mucho en perforaciones, pues expande en contacto con el agua.

ROCAS DE ORIGEN QUIMICO:

El principal constituyente de este tipo de rocas es el carbonato de calcio ($Ca\ CO_3$) y el de Magnesio en menor proporción, ($Ca\ CO_3Mg$), éstos carbonatos se precipitan y forman rocas con una estructura densa en los que pueden existir cantidades menores de detritus.

Un modo de precipitación de el $Ca\ CO_3$, es por calentamiento del agua y pérdida de anhídrido carbónico, quedando libre el $Ca\ CO_3$

Otra forma de precipitación del $CaCO_3$ es la que originan algunos organismos con concha de carbonato; al morir el organismo la concha constituye una partícula clástica que es transportada, fragmentada y desgastada, hasta constituir pequeños granos, la mayor parte de tamaño arena. Esta roca es un sedimento clástico pero al consolidarse y recristalizarse ligeramente después de ser enterrada se convierte en una caliza cristalina.

Otro tipo de roca calcárea orgánica se origina por organismos coloniales como las algas y los corales, que precipitan pequeñas cantidades de $Ca\ CO_3$ en las paredes de sus cuerpos.

En el interior y las paredes se precipita más $Ca\ CO_3$ y así la colonia puede crecer hasta formar un arrecife, que puede aumentar hasta llegar a la superficie o cerca de ella; entonces sufre el ataque de las olas, creándose así una fracción clástica que rellena cavidades entre la masa orgánica que la engloba. De esta forma el arrecife o isla adquiere mayor resistencia. Este tipo de roca es por tanto parcialmente clástica y parcialmente química.

CLASIFICACION DE LAS CALIZAS:

Si en la roca predomina el carbonato de calcio ($Ca\ CO^3$), la roca recibe el nombre de -Caliza- . El carbonato de calcio y nagnesio ($Ca\ CO_3Mg$), recibe el nombre de dolomia y si la roca lo contiene en proporción mayor al 50%, se llama dolomita.

OTROS TIPOS DE CALIZAS QUIMICAS

LA TUFA: Es una roca esponjosa que forma depósitos delgados en la que el $CaCo_3$ se deposita sobre plantas en crecimiento, quedando impresas las hojas y tallos. Se deposita por la evaporación de agua en manantiales y ríos.

EL TRAVERTINO. tiene origen semejante, pero es mas denso, se deposita comunmente en cavernas de caliza donde forma las estalactitas y estalagmitas.

CALICHE:

Se forma en regiones semiáridas por ascención capilar del óxido de calcio. Es importante como índice climático, pues se forma en regiones de escasa precipitación pluvial.

PROPIEDADES Y USOS DE LAS ROCAS CARBONATADAS:

Tienen una gran diversidad de aplicaciones y por tanto gran demanda. La caliza tiene mucho uso como piedra triturada. Como piedra de fusión en industria metalúrgica. Como piedra de construcción en interiores y exteriores. Es el principal elemento para la fabrica -

ción de cemento. Calcinada dá como resultado la cal, y se utiliza también en la industria de lanas artificiales, fabricación de vidrio, refinación de azúcar.

La dolomita se usa también como piedra triturada y, en la fabricación de papel, para la agricultura como fertilizante. Para la obtención de Mg metálico, etc.

ROCAS METAMORFICAS:

Metamorfismo.- Puede ser definido como la respuesta mineralógica a los cambios de temperatura, presión y ambiente químico, que permiten la alteración de los minerales sin pasar por un estado fluído.

En general, los procesos que intervienen, dan por resultado la recristalización de los materiales de la roca original, pero se incluye también la fractura de los granos en el interior de una roca acompañada de recristalización secundaria.

Por tanto, se denomina roca metamórfica a aquella que resulta de la transformación de otra roca.

TIPOS DE METAMORFISMO.

Dinamometamorfismo.- Es el metamórfismo por acciones mecánicas ocasionado, pero no parece probable que factores exclusivamente dinámicos sean generadores de metamorfósis: éste puede romper o deformar los cristales, pero no producir cambios profundos.

Cuando se observa un verdadero metamórfismo, ligado a esfuerzos mecánicos, es probable que hallan intervenido otros factores como temperatura y presión.

METAMORFISMO DE CONTACTO.

Aparece en las zonas limítrofes de los grandes batolitos y sus apófisis.

La intensidad del metamorfismo, decrece conforme la roca se aleja de la intrusión. Este fenómeno no se debe exclusivamente al calor, sino que, ademas, los componentes gaseosos que escapan de el intrusivo, favorecen la metamorfización.

METAMORFISMO REGIONAL.

Afecta primordialmente zonas plegadas y está relacionado con la orogénesis. Afecta a grandes áreas y se debe a temperaturas y presiones altas, sin llegar a la fusión, actuando tiempos largos.

Así pues, podemos decir que el metamórfismo necesita presión, temperatura y tiempo y se favorece por movimientos tectónicos y soluciones que favorezcan el intercambio químico a minerales más densos.

PRINCIPALES ROCAS METAMORFICAS:

MARMOL.- Es una roca cristalina formada principalmente por cristales de calcita. Algunos tienen origen sedimentario provenientes de el metamorfismo de calizas. Son rocas compactas y poco porosas. A menudo tienen vetas por óxidos y sales de hierro y magnesio por grafito. Se utiliza como piedra de ornato.

CUARCITAS:

Son rocas cristalinas silíceas de origen sedimentario o metamórfico. En general, derivan de areniscas silíceas cuyo cemento ha recristalizado alrededor de los granos de cuarzo, pero pueden también provenir de pedernal recristalizado.

Son rocas muy duras, buenas para empedrados, no son aptas para pisos, pues resultan muy resbaladizas. Buenas para piedra de afilar, en general, para cualquier obra de Ingeniería.

ESQUISTOS, PIZARRAS Y MICACITAS.

Son rocas provenientes de el metamorfismo de lutitas y rocas arcillosas. La diferencia entre el nombre, se debe principalmente a la in-

tensidad de el metamorfismo. Constituyen el grupo mas abundante de rocas metamórficas. Son rocas foliadas de dureza variable.

GNEISES.

Son rocas foliadas y bandeadas, con cristales de feldespato visibles y mica abundante. La composición mineralógica es similar a los granitos, los cuales los originan al metamorfizarse, así como otras ígneas.

II.3.- PROPIEDADES FISICAS DE LAS ROCAS.

PESO ESPECIFICO.- Se determina en laboratorio de el modo siguiente:

1o.- La muestra de roca se somete a desecación durante 24 horas en un horno a 105°C, se deja enfriar y se pesa (peso Wo)

2o.- Se sumerge por complete en agua durante unas 48 horas y se pesa ya saturada (Ww) y secada superficialmente.

3.- Todavía empapada se pesa dentro de agua descontando el peso del agua (Ws).

Entonces, el peso específico o densidad será:

$$G = \frac{Wo}{Ww - Ws}$$ Peso específico aparente

La cantidad de agua que satura los poros será:

$A = Ww - Wo$

Esta cantidad deberá restarse del peso Ww, para obtener el peso específico verdadero.

$$G_{verd} = \frac{Wo}{Ww - A - Ws}$$

En general, las rocas ígneas tienen mayor densidad que las sedimentarias.

POROSIDAD:

Es la relación entre el volumen de huecos (poros) y el volumen total de la muestra.

Se determina el volumen de agua que rellena los poros entre el volumen total de la muestra.

$$n = \frac{Ww - Wo}{V} \; 100 \text{ en } \%$$

El volumen V, se determina sumergiendo la muestra saturada en una probeta graduada, ésto es válido en el caso de poros comunicados, o sea determina la porosidad efectiva y no la absoluta.

ABSORCION.

Al sumergir una muestra no absorve tanta agua como permitiría su capacidad teórica, debido al aire aprisionado por el agua que no tiene salida, o arcilla en los poros que no permita el paso del agua.

Expresada en peso la absorción será:

$$\frac{Ww - Wo}{Wo} \; 100 = \frac{A}{Wo} \; 100$$

RESISTENCIA DE LAS ROCAS:

Hay que considerar tres clases de esfuerzos que actúan sobre las rocas:

ESFUERZOS DE COMPRESION.- Tienden a disminuir el volumen del material.

ESFUERZOS CORTANTES.- Tienden a desplazar unas partes de la roca, respecto a las otras.

ESFUERZOS DE TENSION.- Tienden a crear grietas y fisuras.

Las rocas pueden tener resistencia a la compresión y al cortante, pero no la tienen a la tensión.

La resistencia a la compresión de un material es la fuerza requerida para romper una muestra sometida a carga y que no se halle contenida por los lados.

$\mathcal{P}$ = resistencia a la compresión.

P = fuerza para romper la muestra

A = Area de la sección sobre la que se aplica la fuerza

$$\mathcal{P} = \frac{P}{A}$$

La resistencia a la compresión está determinada primordialmente por la textura y en especial por el tamaño de los granos, así una arenisca de grano fino es más resistente que una de grano grueso. En las rocas ígneas y metamórficas, depende del entrelazado de los cristales, siendo mayor la resistencia cuanto mayor sea éste. En rocas sedimentarias la resistencia estará ligada a la que tenga el cementante. Será grande si es sílice y baja si es arcilla. Las fracturas aunque no sean visibles la disminuyen.

Influye también la dirección de las fuerzas, respecto a la estratificación; máxima, si F es perpendicular al plano. La saturación rebaja la resistencia hasta en un 20% en algunos casos, se puede decir así que conforme aumenta la absorción disminuye la resistencia a la compresión.

LA RESISTENCIA A LA TENSION.- de las rocas es siempre inferior a la de la compresión.

La tensión puede desarrollarse no solo por cargas sino por el asiento de una estructura, temblores de tierra o cambios de temperatura.

III.- ALTERACION DE LAS ROCAS, INTEMPERISMO.

INTEMPERISMO O METEORIZACION.- Actúa alterando la roca en la proximidad de la superficie o en ella. Es resultado de la alteración física o química de la roca por los agentes atmosféricos, principalmente el aire y el agua.

PROCESO DE METEORIZACION	Desintegración (Agentes físicos)	F_1.- Cambios periódicos de temperatura F_2.- Congelación y fusión F_3.- Plantas y animales F_4.- Viento (Corrosión o abrasión) F_5.- Topografía
	Descomposición (Agentes químicos)	O_1.- Oxidación y reducción O_2.- Hidratación O_3.- Carbonatación O_4.- Efectos químicos de la vegetación

F_1.- Desiertos.- La roca cede por fatiga a causa de la tensión y compresión. Intemperismo acebollado.

F_2.- La congelación del agua en grietas, fractura a la roca en bloques, aparentemente estables, pero que pueden ceder al estar sometidos a esfuerzos.

F_3.- Poca importancia.

F_4.- El viento actúa como agente de intemperismo de dos modos principales: Por corrosión o choque de las partículas que transporta el viento, contra la roca que se está intemperizando.

Por abrasión o desgaste de esas partículas.

F_5.- La topografía abrupta presenta una mayor exposición de la roca a los agentes de intemperismo y por tanto la favorece.

O_1.- Oxidación.- Adición de iones de oxigeno al mineral de la roca. Es muy común en minerales con fierro.

Reducción.- Extracción de iones de oxigeno de los minerales de la roca. Formación de pirita y muchos otros sulfuros.

O_2.- Hidratación.- Adición de agua a la estructura de los minerales: Ejemplo: Adición de agua a los feldespatos de el granito, resultando arcilla caolinitica.

O_3.- Carbonatación.- Disolución del material de la roca por aguas con un alto contenido de bióxido de carbono (anhídrido carbónico) común en calizas.

O_4.- Agentes químicos de la vegetación.- Los ácidos resultantes de la vegetación, aceleran la descomposición de las rocas. Algunos vegetales como los líquenes extráen ciertos elementos químicos de las rocas.

Por otra parte, las plantas retienen la humedad e impiden la meteorización si bien la alteración puede llegar a gran profundidad.

METEORIZACION EN RELACION CON LOS CLIMAS:

Descomposición.- En climas cálidos y húmedos
Desintegración.- En climas cálidos y secos
Combinación de los dos: En climas templados
Por desintegración de heladas: En regiones frías.

FORMACION DE SUELOS Y SU EMPLEO EN INGENIERIA:

Es raro que al ingeniero de obras públicas y construcciones, le incumban profundidades superiores a los 90 a 100 m por debajo de la superficie del terreno; la práctica habitual se limita, generalmente, a una profundidad de 15-20 m como máximo. La mayor parte de las construcciones ingenieriles, se construyen sobre suelos, según el significado que a esta palabra se da en Geología ingenieril; la excavación en las rocas subyacentes a los suelos, suele ser necesaria solamente, por lo general, para la cimentación y basamento de grandes construcciones tales como puentes de gran categoría o presas de hormigón. Las pistas de aterrizaje de aviones y las carreteras se construyen predominantemente sobre suelos,

aunque ha sido necesaria la excavación de profundas trincheras en rocas para paso de canales y para las grandes vías modernas, autopistas libres o de peaje.

Los productos de dispersión de la destrucción de las rocas, según el mecanismo que acabamos de describir, se llaman derrubios. Aquellos productos resultantes de la desintegración de las rocas del tamaño de la grava para abajo se denominan suelos, según el empleo de este vocablo en geología ingenierial, mientras que los cantos y tamaños superiores se consideran aún como fragmentos de roca. Los suelos pueden ser residuales o transportados. Residuales son los que permanecen en el mismo sitio en que se formaron y todavía yacen directamente sobre los materiales de procedencia o rocas madres. En cambio, suelos transportados son los que han sido llevados más o menos lejos del lecho original de la roca de que proceden para volver a ser depositados en otra localidad. Los agentes del transporte pueden ser el hielo (suelos de glaciar), el viento(suelos eólicos), el agua (suelos aluviales o fluviales) y, finalmente, la fuerza de la gravedad (suelos coluviales , tales como los de talud). Un talud o depósito de ladera es material desprendido de los afloramientos de las rocas y caído y acumulado al pie de la ladera. Los suelos que proceden de erupciones volcánicas, tales como cenizas, también pueden considerarse como resultado de transporte.

METEORIZACION.- En los casos en que la composición o la estructura de las rocas resulte alterada en la proximidad de la superficie terráquea, o en la superficie misma, como consecuencia de la acción de agentes físicos y químicos que intervienen o como resultado de los procesos atmosféricos, se dice que la roca ha quedado meteorizada. Los agentes atmosféricos de acción primordial son el aire y el agua. El vocablo meteorización se emplea a veces como sinónimo de alteración. Sin embargo, los geólogos ingenieriles consideran, por lo general, rocas alteradas aquellas en que el proceso geológico, de origen considerablemente profundo, ha sido de índole tal que ha afectado y cambiado su composición química o estructura. Como ejemplo de proceso de esa índole tenemos la calcinación o fusión de la roca por extrusión de lava fundida o por lixiviación a consecuencia del paso de aguas considerablemente profundas y con contenido ácido.

Los procesos de meteorización se subdividen en aquellos que originan desintegración y aquellos que causan descomposición. La desintegración comprende las meteorizaciones de las rocas por agentes físicos, tales como: a).- cambios periódicos de temperatura.- 2).- congelación y fusión y 3).- efectos físicos de las plantas y animales sobre las rocas. La descomposición se refiere a los cambios producidos por los agentes químicos tales como: 1).- oxidación. 2).- hidratación, 3).- carbonatación y 4).- efectos químicos de la vegetación.

DESINTEGRACION.- La destrucción de las rocas por efectos términos ocurre por la repetición alternante de calentamiento y enfriamiento debidos a los cambios de temperatura diurnos o estacionales. Tal tipo de destrucción resulta especialmente evidente en los desiertos, donde los días son cálidos y las noches frías. La roca cede primordialmente por fatiga, a causa de la continua inversión de los esfuerzos de tensión y compresión que originan en ella los cambios de temperatura. Si los poros de una roca están rellenos de agua, ésta se dilata con la congelación y la roca cede por tensión, por incrementarse la anchura de sus juntas y fisuras. En relación con este fenómeno, las denominadas rocas duras se abren en bloques más o menos regulares a lo largo de juntas preexistentes. Los bloques así formados pueden moverse luego ligeramente cuando se someten a la carga de una construcción pesada, como, por ejemplo, una presa de hormigón. Para garantizar una cimentación sólida y estable a la construcción, se suelen eliminar tales bloques (limpia de la roca).

El proceso de desintegración es activado por la exposición de la superficie de la roca a la acción de los agentes atmosféricos (primariamente en canteras o trincheras o por la eliminación o remoción de la cobertura de suelos como consecuencia de la erosión) y, en menor grado, por las actividades perforantes y excavadoras de pequeños animales y gusanos de hábitos subterráneos. La vegetación es un factor de orden menor en la desintegración de las rocas, aunque las raíces de los árboles pueden quebrantar o incluso partir un gran bloque.

DESCOMPOSICION.- Los diversos procesos que contribuyen a la descomposición de una roca son de naturaleza química. El de oxidación implica que ha habido adición de iones de oxígeno al mineral que la compone; las rocas que contienen hierro, por ejemplo, son muy propensas a la oxidación. El de reducción, por el contrario, se realiza cuando se extraen iones de oxígeno de los minerales de las rocas. La decoloración de algunas rocas (o seudometeorización superficial), se suele atribuir a oxidación, o quizás a reducción de alguno de los componentes químicos de la roca. La hidratación corresponde habitualmente a la adición de agua a los minerales. El agua así añadida es de estructura OH^{-} y debería prestarse atención a su diferenciación del tipo de agua que promueve procesos de desintegración. Un efecto importante de la hidratación es la descomposición de los feldespatos del granito para formar arcillas del tipo caolinita. La carbonatación es la disolución del material de la roca por aguas que contienen una proporción considerable de dióxido de carbono (anhídrido carbónico); puede ser determinante de pérdida de cualidades, de manera especial en las áreas calizas. Todas las aguas superficiales contienen una pequeña proporción de dióxido de carbono.

Los ácidos orgánicos, que se desarrollan donde hay vegetación descompuesta, tienden a incrementar el poder de disolución de las aguas naturales. Algunos tipos de materia vegetal, tales como los líquenes, tienden a extraer ciertos elementos químicos de las rocas. Por otra parte, la vegetación propende a retener la humedad en las rocas y de este modo las protege, al disminuir su velocidad de meteorización. La descomposición puede alcanzar grandes profundidades; en Brasil, se sabe que hay margas que han quedado descompuestas hasta a profundidades de más de 130 m.

La manera según la cual las rocas quedan destruídas por los procesos de meteorización depende en gran parte de las condiciones climáticas. Las rocas se meteorizan predominantemente: 1).- por descomposición, en climas cálidos y húmedos; 2).- por desintegración, en climas cálidos y secos; 3).- por combinación de ambos procesos, descomposición y desintegración, en climas templados, y, finalmente, 4).- por expansión del agua, causante de desintegración en los denimados climas secos y fríos, tales como el ártico y el antártico.

El viento es un agente de meteorización atmosférica muy importante. El viento no sólo transporta materiales de roca meteorizada de uno a otro sitio de la superficie terrestre, sino que también propende a erosionar las rocas existentes. La eliminación de materiales de la superficie mediante la acción de transporte del viento, se conoce como deflación.

III.2- SUELOS:

Debemos decir algo acerca de la terminología empleada en la clasificación de los suelos. Cada uno de los principales grupos denominados grava, arena, limo o silt y arcilla, se basa en el tamaño de las partículas que componen el suelo, por lo general sin tener en cuenta su naturaleza mineralógica. Esto contrasta con la terminología usada en los primeros tiempos de la geología. En ocasiones se usan nombres compuestos, tales como arena cuarzosa o grava calcárea, para describir con más exactitud ciertos materiales, pero es poco frecuente esa práctica. Los nombres compuestos más usuales se refieren a las propiedades físicas, y así se dice arena fina o arcilla consistente. Es probable que, conforme se desarrolle el estudio de los suelos, se haga más frecuente el empleo de los nombres geológicos compuestos.

En cuanto a la terminología que se emplea en los trabajos de campo, así como la empleada para describir las muestras tomadas en los sondeos, se presenta otro problema, pues la elección de los nombres usados para designar los diversos suelos descubiertos es aún una cuestión de criterio personal. Si se desea conservar un criterio uniforme en toda exploración de suelos, es aconsejable relacionar los nombres empleados por los que trabajan con los resultados de las pruebas de laboratorio.

GRAVAS.

Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas, procedentes de su desintegración y que tienen más de 2 mm de diámetro; desde este tamaño mínimo entran dentro del concepto de grava aun la compuesta de los mayores trozos de roca que se encuentran normalmente. Suelen llamarse gravillas los de 4 a 64 mm, grava los de 64 a 256 mm y cantos grandes los que sobrepasan los 256 mm.

CUADRO DE LOS LIMITES DE TAMAÑO DE LOS GRADOS COMUNES Y NOMENCLATURA DE LAS ROCAS

TAMAÑO EN mm.	SEDIMENTARIAS (EPICLASTICAS)				VOLCANICAS (PIROCLASTICAS)	
	REDONDEADO, SUBREDONDEADO SUBANGULOSO		ANGULOSO			
	Fragmento	Agregado	Fragmento	Agregado	Fragmento	Agregado
256	Bloque	Aglomerado	Bloque		Bloque*	Brecha Volcánica
64	Matatena	Grava de Matatenas, Conglomerado de Matatenas		Cascajo Brecha	Bomba**	Aglomerado
4	Canto rodado, guijarro.	Grava de guijarros, conglomerado de guijarros			32 mm Lapilli 4 mm	Toba de Lapilli
2	GRÁNULO	Grava de gránulos				
1/16	Arena	Arena, Arenisca		1 mm grit 1/2 mm	Ceniza gruesa	Toba Gruesa
1/256	Limo	Limo, Limolita			1/4 mm Ceniza fina	Toba Fina
	Arcilla	Arcilla, Lutita				

(*) SEPARADO DE ROCAS ERUPTIVAS PREVIAMENTE CONSOLIDADAS

(**) SOLIDIFICADO DE MATERIAL PLASTICO DURANTE LA EYECCIÓN

Las gravas ocupan muchas y grandes extensiones, pero rara vez se encuentran sin mayor o menor proporción de arena, e incluso de limo, a no ser que estos componentes más menudos hayan sido barridos por al agua después de la deposición de la grava. Son depósitos característicos de aguas someras o corrientes fluciales (incluyendo aquellas que nacen en los heleros); pueden también formarse en las playas y se encuentran en algunos Kames. La forma de cada trozo y su relativa alteración mineralógica dependen de la historia de formación de la grava, pero pueden encontrarse todas las variaciones desde elementos redondeados a angulares. Las gravas que han sufrido tanto transporte que sus elementos se hallan redondeados, suelen estar compuestas de los tipos de roca más resistentes, por lo general mezclados, mientras que las gravas de elementos angulares, como más nuevas, pueden consistir en fragmentos de incluso rocas relativamente tan blandas como las calizas.

ARENAS.

Es el nombre que se da a los materiales granulares finos procedentes de la denudación de las rocas o de su machaqueo artificial y cuyos elementos varían entre 0,053 y 2 mm de diámetro. Diversos autores establecen varias subdivisiones para designar las graduaciones de los tamaños de las partículas; la más usual consiste en fijar el diámetro de 0,42 mm como línea divisoria entre la arena fina y la gruesa. Como es lógico, los suelos arenosos suelen contener cierta cantidad de arcilla y de limo, pero si la proporción de estas sustancias no excede del 20 por 100, la mezcla sigue denominándose arena.

El origen y, por consiguiente, también la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas; las dos se encuentran juntas con gran frecuencia en el mismo depósito. Las arenas de playa que pueden estar actualmente situadas bastante tierra adentro a causa de movimientos corticales, constituyen el tipo más uniforme de depósito; las arenas de río contienen muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava, limo y arcilla

Dista mucho de ser cierta la idea popular de que todas las arenas se componen de partículas de cuarzo, pues, aunque existen las integradas tan sólo por cuarzo puro, la mayoría contienen, por lo menos, un pequeño tanto por ciento de otros minerales. Algunas se componen principalmente de minerales distintos del cuarzo y en los distritos calcáreos se hallan a veces arenas calcáreas. Como regla general, los minerales que constituyen las arenas son bastante estables, pero las arenas glaciáricas pueden contener minerales frescos susceptibles a la meteorización.

La forma de las partículas de arena varía desde las completamente redondeadas a las angulares. Las primeras son raras y están confinadas, por lo general, a las regiones desérticas. La edad de un depósito de arena no influye sobe la forma de sus granos, que depende principalmente de la roca de donde la arena procede y de la historia de su transporte.

LIMOS O SILT.

Es el nombre que se da actualmente a los suelos compuestos de partículas de tamaños intermedios entre los de las arenas y las arcillas, es decir, 0,053 a 0,002 mm de diámetro. La mayoría de los limos inorgánicos tienen poca o ninguna plasticidad y muchos de los glaciáricos se componen de materiales ten frescos que puede llamárseles adecuadamente polvo de roca. Los limos que exhiben algo de plasticidad contienen partículas escamosas, por lo común de minerales arcillosos, posiblemente en estado de formación. Pueden confundirse fácilmente con las arcillas, pues con frecuencia tienen el-típico- color gris de éstas y aparentemente la misma consistencia en húmedo. En general se distinguirán con pruebas muy simples, tales como apretar un poco de suelo húmedo con la mano; la muestra de limo perderá el agua y adquirirá un aspecto lustroso. Los limos secos se desmoronan con mucha mayor facilidad que cualquier arcilla, por lo que producen polvo frotándolos ligeramente. En su posición natural, y especialmente saturados de agua, son prácticamente impermeables. Si se les trastorna, fluyen fácilmente en presencia de un exceso de agua.

RESUMEN TABULAR DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS TIPOS GENERALES DE SUELOS

GRUPO	TIPO GENERAL	CLASIFICACION				OBSERVACIONES
		% DE ARENA	% DE LIMO	% DE ARCILLA	CARACTERISTICAS	
A-1	Arenisca, Migajón arenoso	70-85	10-20	5-10	Uniforme	Alta fricción interna, buena ligazón, alta cohesión, establece bajo el paso de cargas sobre ruedas en cualquier estado de humedad.
A-2	Arena, migajón arcilloso, arcilloso arenoso, migajón arenoso	55 +	Pobre	Rico	Faltan ciertos Tamaños	Alta fricción interna y alta cohesión si estábien proporcionado. Blando cuando está húmedo y polvoriento cuando está seco.
A-3	Arena-grava	50-95	0 - 5	0-10	Grueso	Alta fricción interna, sin cohesión, malo en la superficie, bueno en la base. No afectado por el hielo y el deshielo.
A-4	Migajón limoso, migajón arcillolimoso, migajón arcilloso, migajón	-55	30 -90	10-30	Faltan partículas de tamaño grueso y fino.	Fricción interna, variable, cohesión ligera, alta capilaridad; la absorción deagua los hace inestables; afectados por los hielos y deshielos.
A-5			Como el A-4			Como el A-4, pero elástico, difícil de compactar
A-6	Arcillolimoso, arcilloso	Pobre	Medio	30 +	Faltan partículas de tamaño grueso e intermedio.	Alta cohesión: absorve agua cuando se remueve y se pone blando, quedando expuesto a escurrimientos y deslaves. Poca fricción interna.
A-7			Como el A-6			Como el A-6, pero elástico.
A-8	Turbosos y orgánicos				Gran riqueza en materia orgánica	Inestable.

MODIFICACION DEL CUADRO FORMULADO POR WINTER KORN. LA CLASIFICACION EN LOS OCHO GRUPOS SE BASA EN SU COMPORTAMIENTO Y EN LA DETERMINACION DE CIERTAS PROPIEDADES FISICAS COMO EL INDICE DE PLASTICIDAD, EL LIMITE LIQUIDO Y LA CONCENTRACION O MERMA

ARCILLAS.

Se da este nombre a las partículas de diámetro menor de 0,002 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica cuando se humedece; incluso aunque lleguen al 70 por 100 de su peso, si bien el contenido combinado de arcilla y limo debe exceder del 50 por 100; esta mezcla conserva aún las propiedades características de la arcilla pura. Debe señalarse específicamente la condición de plasticidad que presenta la mezcla cuando está empapada de agua; es posible moler el cuarzo hasta tamaños similares a los de la arcilla y, sin embargo, no tendrán las propiedades características de aquélla. La forma de las partículas está relacionada con sus peculiares propiedades físicas.

El estudio del origen de los suelos y de su deposición demuestra que las arcillas pueden formarse en todos los principales procesos relacionados con la meteorización de las rocas. Pueden ser residuales o de acarreo; estas últimas pueden ser depósitos aluviales de espesor variable y probablemente mezcladas con arena;

Al revés de los otros tipos de suelo, lar arcillas son sensibles a la presión, y así, pueden variar desde muy blandas a extramdamente duras. Se creía que las pizarras procedían de las arcillas sujetas a grandes presiones durante considerables períodos, pero hoy, este punto de vista es por lo menos discutible. Por eso, cuando una masa de esta arcilla consolidada es trastornada por completo, pierde sus propiedades originales, que no pueden recuperarse.

SUELOS ORGANICOS.

Aunque no es frecuente encontrar suelos orgánicos en el curso normal de las obras de ingeniería, su presencia puede dar lugar a verdaderos problemas. Consisten esencialmente de materia orgánica muerta procedente de una antigua vegetación y tienen a menudo una capa superficial de vida vegetal en diversos grados de decaimiento y un contenido variable de agua que puede llegar hasta más del 1000 por 100 de su peso. Recibe diferentes nombres, de los que los más usados son: ciénegas, turberas, marjales y tierras pantanosas.

En contra de la creencia popular, los suelos orgánicos son mucho más abundantes en el norte y van disminuyendo a medida que nos acercamos a las áreas tropicales. La velocidad de desintegración de la materia orgánica, es tan rápida en los climas tropicales que no hay tiempo, por así decirlo, para que se formen suelos orgánicos. Los suelos orgánicos son rara vez de gran profundidad. Suelen encontrarse en antiguas depresiones del terreno, que facilitaron la acumulación de agua. Tienden por su estructura a ser esponjosos, por lo que la desecación de dichos terrenos es uno de los más molestos de los problemas asociados a estos suelos. Pueden ser considerados como un conjunto de vegetación fósil.

III-3.- MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

a).- MATERIALES PARA PRESAS DE TIERRA:

Las investigaciones preliminares en el lugar en que ha de erigirse una presa de tierra deben incluir, como es natural, una debida atención a la geología local. Sin embargo, esos estudios no han de limitarse al lugar de construcción, si se prevé la posibilidad de adoptar una presa de tierra como proyecto definitivo; los estudios del subsuelo han de continuar por las cercanías hasta que se hayan localizado niveles uniformes de terrenos utilizables, lo bastante extensos para suministrar los materiales precisos para la construcción. Este trabajo se llevará generalmente con arreglo a las normas establecidas, utilizando sondeos, pozos de reconocimiento y posiblemente la investigación geofísica para complementar y confirmar las observaciones de la superficie. También hace falta obtener muestras de los materiales en cantidad suficiente para su estudio detallado; no es preciso que sean inalteradas, ya que los terrenos muestreados han de ser removidos si quieren emplearse en la construcción de la presa. Si las pruebas preliminares sobre el tamaño de grano, permeabilidad y porosidad demuestran que el material es utilizable, serán necesarias investigaciones más detalladas de los lugares que suministran dichos materiales, lo que puede realizarse el número de sondeos y la toma de muestras.

Existen pocos tipos de mezclas de suelos que, conteniendo la conveniente proporción de materiales menudos, no puedan usarse con buen éxito

en la construcción de presas de tierra, de modo que, una vez localizado un lugar donde ese material exista, la geología cesa de tener significado especial, en lo que se refiere al proyecto de la presa. Los métodos de construcción dependen, en cierto modo, del tipo de suelo que se emplee, Las presas construidas de sucesivos lechos apisonados, suelen hacerse de material con un alto contenido de arena y grava, por lo menos aguas abajo de la pared central, si se ha incluído ésta en el proyecto. La facilidad con que el material pueda extenderse y apisonarse es un factor decisivo, que automáticamente elimina muchos suelos que contengan una notable proporción de arcilla.

1).- ARCILLA PLASTICA:

Las tres condiciones principales que ha de poseer la arcilla utilizada en la construcción de presas son su cohesión, su impermeabilidad y la facultad de secarse sin agrietarse o contraerse demasiado. Estas propiedades se comprobaban en el pasado, mediante simples ensayos en el campo. Aunque ahora han sido desplazados por los ensayos más detallados realizados en los laboratorios de mecánica del suelo, merecen, al menos, cierta atención, ya que se aplicaron con buen éxito a lar arcillas empleadas en muchas notables presas de tierra. La coherencia se determinaba amasando un cilindro de arcilla de 2,5 cm de diámetro y 30 cm de longitud, que no debía romperse cuando se le suspendía de un extremo. La permeabilidad se probaba haciendo una tinaja de dicha arcilla capaz de contener varios litros de agua y comparando las pérdidas producidas con las de igual volumen de líquido colocado en una vasija impermeable. Bastas y sencillas, como ahora nos parecen esas pruebas, han demostrado su gran utilidad en el pasado.

B).- LADRILLOS.

Es raro que los ingenieros necesiten fabricar ladrillos, pero, lo mismo que con otros materiales de construcción, deben conocer el origen de sus materias primas y los principales rasgos de su fabricación. Los ladrillos son de tres clases principales: de concreto, de cal y arena y de arcilla cocida. Las dos primeras clases tienen poca relación directa con la geología. Se fabrican mediante procesos especiales, en el primer caso a partir de mezclas de cemento portland y áridos, y en el

segundo de arena y cal.

Las dos propiedades que han dado tanto valor a lar arcillas como materia prima en la fabricación de muchos útiles objetos, son su plasticidad, por la que pueden moldearse, en estado húmedo, en todas las formas imaginables, y el modo como se endurecen, sometidas a la acción del calor, lo que permite fijar permanentemente la forma que se les haya dado. Usamos la voz -plasticidad- en relación con los procesos de moldeo: si una arcilla es demasiado plástica se resistirá al amasado y si lo es poco, puede romperse al moldearla. Por lo tanto, se usan a veces mezclas de arcilla y arena para obtener un material satisfactorio para dicha operación. La contracción de las arcillas es otra importante propiedad en relación con la manufactura de ladrillos, en la que es conveniente que aquélla sea uniforme. Son complicados los fenómenos que se producen al calentar las arcillas, pero, en general, dos fases reconocibles tienen importancia en la fabricación de ladrillos; aquella en que la arcilla se vitrifica o endurece alfundirse la masa entera, conservando su forma y aquella en la que la masa se hace blanda o viscosa por excesiva fusión y pierde su forma. Evidentemente es deseable, en la manufactura de ladrillos en grandes hornos, que exista un apreciable intervalo de temperatura entre ambos escalones.

La combinación de estas propiedades determina la utilidad de una arcilla para hacer ladrillos, siempre que el material sea uniforme, limpio y libre de cantos de mayor o menor tamaño. Así, aunque la mayoría de las arcillas admiten cocimiento para producir alguna especie de ladrillo, de ningún modo todos los ladrillos resultantes pueden usarse con éxito en la construcción. La presencia de cantos en la arcilla es una dificultad positiva, pero no insuperable, pero si son de caliza o la arcilla es calcárea, convendrá buscar otra más apropiada.

Los ladrillos prensados de alta calidad, se hacen de arcillas o pizarras arcillosas especialmente puras y, a veces, con arcillas refractarias de clase inferior; estas últimas son las que pueden soportar, sin fundirse, una temperatura muy alta y, como se sabe, se emplean en la fabricación de ladrillos refractarios.

Los ladrillos para pavimentación se fabrican con arcillas que pueden ser moldeadas mecánicamente con precisión y que vitrifican a temperaturas moderadas

Es opinión bastante extendida que el color de los ladrillos es una indicación de su calidad, pero, en general no hay relación entre color y calidad. La arcilla pura es blanca y el color que suele tener se debe a óxidos y sustancias carbonosas. Cuando se cuecen las arcillas, las blancas por lo común se conservan así; los ladrillos coloreados proceden de arcillas que también lo son, aunque su tinte pueda variar durante el cocimiento. El efecto del óxido de hierro es darles color rojo o abigarrado; si hay caliza, se compensa el efecto del óxido de hierro y el ladrillo adquiere un color crema o amarillo.

Por último, hay que citar el hecho de que en algunas partes de Estados Unidos, en donde no existen afloramientos de roca que puedan utilizarse para balasto de vías férreas, se ha usado con abundancia y buen éxito arcilla cocida. Este mismo material se ha empleado incluso para el revestimiento de protección de los taludes de las presas de tierra, como, por ejemplo, la presa Keystone (Kingslev), una estructura de tierra apisonada en la que fue necesario hacer un revestimiento de 420 000 m^2 La cantera más próxima de roca apropiada para este propósito estaba a 300 km de distancia y su transporte por ferrocarril resultaba demasiado costoso. Se hicieron bloques de cerámica fundiendo ladrillos ordinarios, consiguiéndose una densidad de 1,20 y todas las propiedades requeridas para un material de revestimiento en el sentido de absorción, rugosidad y resistencia al desgaste. Este revestimiento de cerámica ha cumplido ya los 20 años y se ha comportado satisfactoriamente. Es un excepcional ejemplo de los variados usos de los productos derivados de las arcillas en la práctica de la ingeniería.

C).- OTROS PRODUCTOS ESTRUCTURALES ARCILLOSOS:

Otras aplicaciones de la arcilla como material de construcción son, por ejemplo, los ladrillos huecos y la terracota; ambos productos se emplean ahora mucho en los edificios con estructura de acero o de concreto armado.

La manufactura de todos estos ladrillos es análoga a la de los ladrillos comunes. Se emplean arcillas de grano muy fino y, debido a las formas de estos productos, el proceso de fabricación se lleva bajo una rígida inspección y vigilancia. Todas las arcillas empleadas se someten con regularidad a cuidadosos ensayos y análisis para evitar un exceso de impurezas tales como hierro, magnesio y cal.

Las tuberías para saneamiento han de recibir un vitrificado durante su manufactura, operación que se hace con sal o con un agente vitrificante especial: se dice que es conveniente que tengan un contenido alto de hierro, pero el principal requisito exigible en las arcillas para la fabricación de tuberías es que tengan una alta proporción de fundentes para que vitrifiquen con facilidad. Los materiales más corrientemente empleados en la fabricación de ladrillos huecos, son las arcillas refractarias de primera y segunda calidad, las arcillas para ladrillos de primera calidad y ciertas pizarras arcillosas adecuadas.

D).- PIEDRA DE CONSTRUCCIÓN.

Es este un evidente requisito preliminar para el uso de la piedra tallada, que sólo puede determinarse mediante una investigación geológica. En terrenos con afloramientos abundantes, es tarea sencilla, pero en los cubiertos por suelos de acarreo serán esenciales los servicios de un geólogo experto.

COSTE RELATIVO DE LA PIEDRA TALLADA.

En ingeniería apenas se usa, excepto con fines decorativos, a no ser que se demuestre que resulta más económica que el concreto. El coste de la piedra puesta en la obra depende de su facilidad de arranque, longitud del transporte y coste del tallado (incluyendo las pérdidas de material). Los costes de arranque y tallado vienen determinados por la naturaleza de la roca; las masas de rocas ígneas duras son evidentemente mucho más caras de trabajar que una caliza cuarteada, que puede arrancarse sin explosivos y tallarse con facilidad. Por tanto, las investigaciones geológicas ayudarán a determinar el coste y en particular a asegurar la homogeneidad de la masa rocosa.

ASPECTO DE LA PIEDRA TALLADA.

El aspecto final de la piedra tallada dependerá de su textura, de su composición mineralógica y de la meteorización a que ha de exponerse. En las obras de ingeniería no es su bello aspecto lo que determina la selección de la piedra, aunque ello sea deseable en las expuestas a la vista del público. Generalmente se suele atender a su uniformidad de color y textura, lo que puede comprobarse mediante el examen visual de la masa rocosa antes de su arranque, junto a la apreciación de su naturaleza geológica.

RESISTENCIA Y PESO DE LAS PIEDRAS DE CONSTRUCCION.

Estas propiedades físicas son de evidente importancia en relación con su utilización en obras de ingeniería; dependen de la naturaleza geológica de la roca.

Una indicación de la influencia de la naturaleza geológica sobre dichas propiedades es el hecho de que las rocas de grano fino son, por lo general, más resistentes que las de grano grueso. La resistencia de las rocas porosas (en particular, las areniscas), depende de la cantidad de agua que contengan, por lo que los ensayos sobre ellas deben hacerse siempre sobre muestras húmedas y secas. La variación en su resistencia puede llegar al 50 por ciento de la de la piedra en seco, por lo que siempre que haya de utilizarse esta última es aconsejable adoptar amplios factores de seguridad.

DURACION DE LA PIEDRA:

Es una de las primeras exigencias en ingeniería. Dicho en términos sencillos, la duración de una piedra es su capacidad para conservar su tamaño, resistencia y aspecto originales durante un largo período de tiempo, mientras que cumple con el papel que se le asignó en la estructura de que forma parte. En esencia, la duración está relacionada de modo directo con los procesos normales de meteorización de las rocas. La primera y más indispensable prueba de una piedra, debe hacer

se, por tanto, visitando la cantera de la cual procede y examinando allí los testimonios de meteorización en las superficies naturalmente expuestas, de la roca aún no explotada. Si ésto fuera siempre posible y se hiciera práctica invariable, se evitarían muchos disgustos. Las condiciones de exposición de una cantera pueden no ser comparables con las que ha de sufrir la roca tallada. Esto es especialmente cierto si la piedra ha de emplearse en áreas urbanas, donde la atmósfera suele estar cargada de hollín y de gases procedentes de industrias, que pueden tener tendencia a formar ácidos débiles al combinarse con la humedad atmosférica (el contenido de ácido sulfúrico de las capas de hollín que se acumulan en las cornisas de los edificios puede alcanzar el 5 por 100). Por consiguiente, una segunda prueba de carácter muy general será examinar piedras sacadas del mismo tajo después de exponerlas al mismo tipo de condiciones atmosféricas que las consideradas y comparar el resultado de tales observaciones con el tiempo que haya durado la exposición.

EMPLEOS DE LA PIEDRA DE CONSTRUCCION.

El gran número de factores variables que influyen en la duración de la piedra indican que deben observarse ciertas restricciones, en relación con su utilización; que ayudarán a su preservación. Indicaremos algunas. Ya hemos mencionado la conveniencia de asentar siempre las rocas sedimentarias paralelamente a sus planos de estratificación. Si ha de emplearse piedra tallada, debe determinarse esa dirección antes de su desbaste. En el caso de piedras porosas, deben tomarse todas las precauciones posibles para facilitar la salida del agua, en especial porque algunas piedras se hacen más permeables cuanto más humedad contienen. No debe dejarse sin protección ninguna cornisa, en particular si la piedra está expuesta a una atmósfera urbana. Hay que tener el mayor cuidado en la selección y uso del mortero que se emplee en las juntas. El cemento Portland no debe usarse con areniscas o con algunas calizas. SE ha observado en algunos edificios de Liverpool (Inglaterra), la formación de oquedades en calizas (y areniscas) de excelente calidad y, aunque la causa exacta no está bien determinada, las eflorescencias que la acompañan sugieren que se debe al empleo de cemento Portland. Todo -

mortero para piedra debe poseer el menor contenido posible de cal y cemento. Algunos autores aconsejan que no se haga el retundido de las juntas para asegurarse de que no quedan herméticamente cerradas. Calizas y areniscas no deben usarse nunca en hiladas alternantes.

E).- CAL Y YESO.

Aunque su importancia ha disminuido mucho con el firme avance del concreto y productos derivados, la cal aún se usa en relación con la edificación y fábricas de mampostería, y, así, tiene importancia para los ingenieros. La cal y la cal viva son óxidos de calcio y nunca se encuentran en la Naturaleza: en sus formas impuras se preparan calcinando calizas, cuyo carbonato cálcico pierde su dióxido de carbono y se convierte en óxido cálcico mezclado con todas las impurezas presentes en la caliza original. La propiedad característica de la cal es la de apagarse en contacto con el agua; el hidróxido de calcio es el resultado de la fuerte reacción química entre los dos. El apagado de la cal se manifiesta por una efervescencia general y por la desintegración de los grumos que suele contener la -cal viva-,obtenida en la calera. La -cal apagada-, tiene la propiedad de fraguar a la atmósfera y por esta razón se usa como mortero.

Las impurezas de la caliza varían en cantidad desde ligeros indicios hasta un elevado tanto por ciento del volumen total de la roca, y determinan en gran medida la clase de cal que se obtendrá al calcinarla. Con frecuencia no pueden distinguirse a simple vista esas impurezas, pero pueden determinarse de modo aproximado atacando el carbonato de calcio con ácido clorhídrico. Cuando el ingeniero tiene que probar una caliza como posible productora de cal, el camino más fácil consiste en calcinar una cantidad reducida de la roca y examinar entonces las propiedades de la cal resultante. Las impurezas más abundantes son las síliceas y las arcillosas, que tienen por efecto retrasar el apagado de la cal viva y desarrollar sus propiedades -hidráulicas-, ésto es, su facultad de fraguar bajo el agua. Las -cales hidráulicas- que así se llaman, suelen ser amarillentas, en contraste con la cal viva pura, que es blanca; fra-

guan con lentitud y tienen poca resistencia, a no ser que se mezclen con arena.

Naturalmente, las impurezas que motivan estas variaciones en las propiedades de la cal dependen del proceso de formación de las calizas de las que se extrae la cal. Pueden variar, por lo tanto, de una manera considerable, incluso entre la parte superior e inferior de un mismo banco. En la explotación de canteras de calizas destinadas a la fabricación de cal, es preciso vigilar con cuidado la naturaleza exacta de la roca que se está arrancando. Por ejemplo, en las conocidas capas liásicas de Inglaterra. Las calizas con fósiles, pueden producir cal con propiedades variables, a causa de la peculiar calcinación de algunos materiales fósiles. Pueden quedar partículas menudas que no intervengan en el proceso de apagado de la cal y que, como consecuencia, absorvan agua y tiendan a desintegrar la masa de material que las rodea.

La fabricación de la cal se hace en hornos calentados con carbón, gas o leña; la calcinación se produce hacia los 900°C, o algo menos si se forma vapor en el horno. Temperaturas más altas causarían la aglomeración (clinkering) o fusión parcial de la roca si ésta contiene impurezas arcillosas. La cal vival se obtiene en bloques correspondientes a los de la roca original; se suele apagar en cajas especiales antes de usarla.

Los yeses que tan importante papel tienen en el acabado de la construcción, derivan principalmente de los depósitos de yeso, el sulfato hidratado de calcio, el cual se presente, por lo general, en masas sólidas, pero también en algunos sitios como material arenoso suelto. Los yacimientos de yeso están ampliamente distribuídos. Con frecuencia es muy puro, habiéndose originado probablemente por la evaporación de aguas marinas y la consiguiente concentración de sales disueltas. A menudo se encuentran asociado con sal común. Es frecuente que se transforme en anhídrita, el sultado anhidro de calcio, del cual siempre se encuentra cierta cantidad en la mayoría de los depositos de yeso. Al revés que éste, la anhidrita tiene un valor comercial limitado, y por eso es preciso distinguirla y separarla cuidadosamente de aquél. Cuando se calienta el yeso puro entre los 120 y 200°C, pierde la mayor parte de agua combinada,

convietiéndose en una sustancia amorfa que se conoce comercialmente con el nombre de -escayola- o -yeso de París-, la cual, mezclada con agua, toma en combinación química tanta como la que había perdido antes y fragua en una masa compacta y dura.

F).- CEMENTO.

Dada la gran facilidad de adquisición del cemento Portland, preparado por expertos fabricantes según rígidas normas de calidad, el ingeniero pocas veces tiene que prestar atención a su origen. Sin embargo, es tan amplio el empleo del cemento y han sido tan grandes sus efectos en la construcción moderna, que está justificado insertar una breve nota acerca de los aspectos geológicos de su fabricación. El cemento Portland fue patentado en 1824 por un inglés, Joseph Apsdin y recibió ese nombre porque extraía su caliza de las famosas canteras de Portland.

El cemento es un producto artificial, puesto que se hace por la fusión parcial de una mezcla especialmente preparada de materiales naturales; se usa la voz -artificial- para distinguirlo de los cementos naturales, que más adelante mencionamos. La mezcla usual para fabricar el cemento consiste en caliza (que da la cal necesaria), arcilla o pizarra arcillosa (que proporcionan las cantidades necesarias de sílice y alúmina) y una pequeña cantidad de óxido de hierro. El producto (llamado universalmente clinker) obtenido al calentar esa mezcla, se muele finalmente para lograr ese polvo gris amorfo tan familiar pata todos los ingenieros. Las calizas empleadas pueden variar mucho en dureza, textura y composición química; pero la magnesia, la sílice libre y el azufre son constituyentes que hay que evitar. Las arcillas utilizadas son, a menudo impuras, pero es preciso que no contengan cantos o partículas sólidas libres. Las proporciones relativas de los diferentes materiales pueden calcularse cuando se conoce la naturaleza de aquéllos; ésta es una de las varias fases de la fabricación del cemento que ha de estar a cargo de expertos. El cemento Portland se distingue por su resistencia relativamente alta y su fraguado lento y uniforme cuando se mezcla con agua. Su composición química exacta es complicada, pero con los modernos métodos de análisis se ha conseguido obtener ciertos conocimientos sobre ella.

Además del típico cemento Portland, se emplean otros varios especiales para usos poco comunes. Así, con fines decorativos se usa el cemento blanco que se obtiene empleando arcillas que al quemarlas adquieren un color final blanco. El cemento aluminico, llamado así porque lleva una elevada proporción de alúmina, se obtiene mediante la fusión de una mezcla de caliza, bauxita y coque: fragua con mucha rapidez y se dice que es más resistente a la acción del agua del mar que el cemento Portland ordinario. Diversas pruebas han demostrado indiscutiblemente que es más resistente a la acción de las aguas ácidas de los terrenos pantanosos.

ARENA.

Se emplea en construcción, no sólo como relleno y para hacer firmes porosos permeables (por ejemplo, en los caminos), sino también y en gran escala como medio filtrante y como componente de morteros y concretos. Teniendo en cuenta estas importantes aplicaciones, debe advertirse que la palabra -arena- se emplea para describir los materiales naturales compuestos por granos de cierto tamaño, independientemente de su forma, uniformidad y composición mineralógica. Estas tres características principales de las arenas dependen de su proceso de formación, es decir, de la meteorización de la roca original y del tipo de transporte antes de alcanzar su posición final. Es importante su naturaleza mineralógica, sobre todo si se tiene en cuenta la popular creencia de que todas las arenas se componen de partículas de cuarzo, porque, si bien éste es con frecuencia su principal componente, la arena de sílice pura es antes la excepción de la regla. Dependiendo de la naturaleza de la roca de donde procede la arena y de los procesos erosivos a que haya estado sujeta, pueden encontrarse muchos otros minerales. A veces contiene mica: con más frecuencia feldespato y hasta arcilla pizarrosa en ocasiones. La existencia de tales materiales en la arena hace imperativo su análisis detallado antes de que se la emplee, por ejemplo, para hacer concreto. El feldespato no es un mineral muy estable y parece que su presencia en algunas arenas es la causa responsable de la aparición de ciertos concretos de las llamadas -grietas capilares-. Las partículas de arcilla pizarrosa y de sales solubles pueden ser igualmente perjudiciales.

Las condiciones que se exigen a la arena para fabricar concreto,

suelen excluir todas las que contienen sustancias deletéreas y limitan al 5 por 100, e incluso menos, la proporción de arcilla y limo. Por lo general, también se excluyen las arenas que no estén limpias, término usado para indicar que se hallan exentas de materias orgánicas tales como el ácido tánico de origen vegetal.

La uniformidad de tamaño de grano es importante cuando se trata de arenas para preparar muestras de concreto para ensayos y en las que se emplean como medio filtrante: para este último propósito, las arenas deben tener una alta proporción de sílice, además de un tamaño uniforme de grano.

Las arenas que han estado sujetas a la acción marina, suelen ser de grano fino y bastante uniformes; las de río pueden tener propiedades similares, pero es probable que sean más variables: las glaciáricas están a menudo mezcladas con grava y no son tan uniformes. Todos estos diversos tipos de arena tienen formas características de grano, no siendo redondeados por lo general. Los granos redondeados son una indicación de depósitos de carácter eólico.

PIEDRA TRITURADA.

Se usa en ingeniería para múltiples propósitos y tiene la ventaja sobre la grava natural de que sus elementos son de forma angular y de que los límites de distribución de tamaños pueden regularse a voluntad. Se emplea extensamente como balasto en las líneas férreas y como grava en las carreteras. Muy útil es como tipo especial de relleno, sobre todo en las obras de avenamiento. Se emplea también mucho como árido grueso para el concreto.

Aunque la planta de trituración, puede a menudo constituir la unidad clave de un programa de construcción de gran escala, es con demasiada frecuencia la menos apreciada y comprendida porque se la considera, por lo general, como una operación rutinaria. Está lejos de ser ésto, y exige tanta atención por parte del ingeniero como la pueda exi

gir la maquinaria más compleja, requiriendo, además, la apreciación del significado geológico de los tipos de roca que han de ser triturados.

El efecto de los diferentes tipos es evidente por el hecho de que mientras unas mandíbulas de trituradora duran solamente diez días quebrantando granito, otro par de mandíbulas exactamente iguales duran hasta siete años trabajando con caliza; esta sorprendente diferencia es debida a las variaciones en la tenacidad y dureza de las rocas.

La forma de los fragmentos obtenidos en una trituradora está influída grandemente por las superficies de debilidad de la roca, pero en general, depende de la naturaleza y dirección del choque producido por la trituradora, o sea del tipo de máquina que se haya usado. El tamaño del grano es también importante, y así las rocas de grano grueso son más débiles que las de grano fino. En el caso de rocas sedimentarias, es también factor influyente su edad geológica.

Son tantos los factores variables, que no es posible hacer declaraciones específicas, respecto a las condiciones de fracturación de cada tipo de roca. Pueden servir de guía las siguientes líneas generales. Los granitos tienen propiedades muy variables, aunque su comportamiento depende de su resistencia al choque; los pórfidos son generalmente muy duros y tenaces; los basaltos presentan grandes variaciones, y su resistencia a la fracturación depende de la porosidad, producida posiblemente por descomposición parcial; las cuarcitas son moderadamente tenaces y los gneises mucho menos, a causa de su estructura foliar. En muchas rocas sedimentarias la naturaleza de su cemento determina su comportamiento durante su fracturación.

Otra extensa aplicación de la piedra triturada: para los revestimientos de protección en superficies erosionables, tales como los paramentos de presas de tierra y de terraplenes. Constituye aún uno de los tipos más efectivos de protección de taludes, cuando se elige una roca adecuada y se instala el revestimiento cuidadosamente.

Debe por último mencionarse el empleo de roca quebrantada, pero no triturada, para la construcción de presas.

CONCRETO.

Es uno de los tres principales materiales de construcción que utiliza la ingeniería moderna, y acaso el que más detenidamente debe estudiar el ingeniero. La calidad de una determinada pieza de madera no puede variarse y el acero tiene también unas propiedades físicas definidas, pero la calidad y resistencia del concreto dependen del constructor, lo cual supone para éste a la vez una oportunidad y una responsabilidad que le obligan a un continuado estudio y experiencias sobre la técnica del concreto.

No obstante, los muchos factores que determinan la calidad definitiva del concreto, la naturaleza de los áridos es siempre de primordial importancia, lo cual se apreciará mejor si se recuerda que en un concreto corriente el 70 por 100 de su volumen y, posiblemente, el 80 por 100 de su peso corresponden a los elementos gruesos. La atención que suele dedicarse a los ensayos sobre esos elementos gruesos, no está siempre de acuerdo con su importancia en el producto ya terminado. Comparada con la que se dedica al cemento, la comprobación de la conveniencia de un cierto árido es a veces insignificante. Aunque el antiguo dicho de que - la resistencia de un concreto es la resistencia de sus áridos-, no puede considerarse, por lo general, exacto, nos da una buena indicación de su importancia en la mezcla. Por tanto, un buen árido no asegura una buena calidad del concreto, porque las posibles variaciones en la graduación de tamaños, mezcla y coloración (-aparte de las condiciones climáticas durante el fraguado), son tantas que pueden contrarrestar con mucho las ventajas iniciales que presente un árido extraordinariamente consistente y fuerte. Por otro lado, el empleo de un árido de mala calidad es uno de los caminos más fáciles para obtener un concreto que sea origen de constantes molestias.

Cinco condiciones principales debe reunir un buen árido, debe ser limpio, duradero, estar correctamente graduado el tamaño de sus elemen-

tos, uniforme tanto en esa graduación como en calidad y no poseer características químicas que le hagan reaccionar con el cemento portland después de su mezcla y colocación. La graduación de tamaños puede conseguirse en la planta de trituración y cribado, cuando se trata de piedra machacada. De igual modo puede asegurarse la uniformidad mediante la atenta inspección de los envíos procedentes de la planta. La limpieza puede obtenerse adoptando las medidas apropiadas, y la duración determinarse antes de elegir un árido para su utilización: estas dos últimas propiedades dependen de la historia geológica y de la composición de las rocas que van a emplearse.

La limpieza exigible en los áridos gruesos es semejante a la que se requiere en los menudos, siendo las impurezas orgánicas la -suciedad- más objetable. Estas impurezas, suelen estar en forma de ácidos orgánicos débiles y sus derivados y pueden hacer peligrar seriamente el fraguado del cemento.

Ahora es casi universal el uso de una prueba colorimétrica, en la que se emplea una solución de 3% de sosa cáustica, para indicar la presencia de materia orgánica. Es especialmente interesante advertir que esos ácidos orgánicos no se encuentran en las arenas calcáreas, ni en las calizas y rocas calcáreas análogas, con cuyo carbonato de calcio, reaccionan dichos ácidos. Este sencillo fenómeno geológico puede ser una útil guía para encontrar un buen árido.

Con frecuencia es necesario lavarlos con agua, no sólo para quitarles las impurezas orgánicas, sino también el polvo y la suciedad superficial: es también imprescindible con ciertos tipos de roca triturada, con objeto de remover el propio polvo de la roca que queda unido a los fragmentos grandes durante su machaqueo y que puede ser una posible causa de futuros deterioros. Así, las diminutas partículas de feldespato, formadas durante la trituración de algunos granitos, afectan a la calidad del concreto, lo mismo que otros minerales perjudiciales que contenga la roca.

Los minerales perjudiciales en la piedra de construcción lo serán también por las mismas razones, en las que se empleen para fabricar concreto. Probablemente, el inconveniente más grave es la presencia de materiales que se hinchen en contacto con el agua.

Esta última condición es de excepcional importancia en el concreto ya que muchos tipos de rocas que no se considerarían apropiados para piedras de construcción, se utilizan con frecuencia para fabricar concreto.

En muchos casos los ingenieros se han visto obligados a utilizar rocas inadecuadas, en contra de su mejor criterio. La caliza que contiene arcilla , o -caliza arcillosa-, parece fuerte y duradera recién arrandada de la cantera, pero es completamente inadecuada como árido del concreto. De igual modo son indeseables las lutitas y las metamórficas.

Otros tipos de pizarras, si son relativamente fuertes, pueden usarse algunas veces, aunque su típica estructura laminar es siempre causa de debilidad. Por lo tanto, la arcilla debe evitarse en cualquier forma que se presente: el examen petrológico servirá para descubrirla.

La porosidad de la roca es tan importante en la fabricación del concreto, como cuando se trata de usarla como piedra de construcción. Además de la normal penetración de la lluvia en los elementos que queden expuestos a la atmósfera, debe recordarse que durante la fabricación del concreto, éste tiene un alto contenido de agua, por lo que los áridos empleados estarán saturados: ésto puede dar lugar a extraños resultados,en especial si el concreto sufre la acción de una helada antes de que haya tenido tiempo de fraguar su parte externa de modo permanente. La congelación del agua que satura los áridos puede producir la desintegración de un concreto que, en otras condiciones, hubiera sido resistente. Esto nos demuestra que el árido empleado es sólo una de las variables que intervienen en la preparación de un buen concreto. Esta es, probablemente, la razón por la que es un poco difícil especificar exactamente las características convenientes en un árido para formar un concreto de alta calidad. Normalmente se prohibe el empleo de los materiales reconocidos como perjudiciales, tales como el yeso, la anhidrita y el sílex. Es tam -

bién frecuente prohibir todo contenido de arcilla o limitarlo a un tanto por ciento muy pequeño. También pueden excluirse las rocas metamórficas de condición dudosa, debido a su estructura foliácea. Quedan todavía otros muchos minerales potencialmente peligrosos, pero es imposible anotarlos todos en las especificaciones normales. Para salvar esta dificultad, puede incluirse en los contratos una cláusula general que limite el uso de los áridos a los obtenidos de orígenes conocidos o aprobados, siempre que ésto no presente serios problemas para el contratista.

Estos comentarios han sido necesariamente generales, pero no es difícil ver que el estudio petrológico de la piedra triturada y la arena, en lo que se refiere a su aplicación en la fabricación de concreto, es un amplio campo de investigación. Tres aspectos especiales, sin embargo, exigen siquiera una breve mención en este resumen. En aquellas partes del mundo en que el agua subterránea tiene un alto contenido de sulfatos, como en las llanuras occidentales del Canadá, debe hacerse un estudio especial sobre la posibilidad de desintegración del concreto por su reacción con dichos sulfatos. Si se comprueba que existe ese peligro, deben emplearse cementos especiales resistentes a los sulfatos.

Un problema más moderno lo plantean los concretos especialmente densos, necesarios en las plantas nucleares para protección contra las radiaciones. Entre los áridos especiales utilizados están la limonita y las baritas para pequeños aumentos de la densidad: la magnetita y la ilmenita para aumentos medios, y los ferrofosfatos o incluso las limaduras de acero para concretos muy pesados. Naturalmente, son posibles diversas mezclas de estos materiales. Se han encontrado algunas dificultades con los ferrofosfatos, pero la ilmenita ha probado ser muy satisfactoria y es probablemente el árido especial más utilizado en las instalaciones nucleares.

Por último, uno de los problemas del concreto más complejos y molestos en la interacción de algunos tipos de áridos con los cementos muy alcalinos.

Hoy existen diversas pruebas para descubrir estos áridos -reactivos-, entre los que se cuentan las rocas volcánicas ácidas e intermedias y las tobas, sílex y calizas silíceas. Las experiencias en Kingston, Ontario, han demostrado que ciertas calizas dolomíticas no responden a estas pruebas y sin embargo, reaccionan con los cementos alcalinos que normalmente se vienen usando desde hace mucho tiempo en Quebec y en la parte oriental de Ontario. Aún no se conoce con certeza la causa exacta de esta reacción, pero una simple prueba con una barra de acero constituye una guía infalible del carácter de los áridos calizos; la mayor desventaja de tal prueba es que son necesarios 3 meses para obtener una respuesta positiva. Por lo tanto, debe tenerse mucho cuidado en el empleo de calizas dolomíticas para fabricar concreto, en particular si el cemento que se piensa usar tiene un contenido alcalino mayor que lo normal.

IV. ESTRUCTURAS GEOLOGICAS.

IV-1.- Vulcanismo y Plutonismo.

Las rocas ígneas son el producto de la consolidación del magma procedente del interior de la tierra. Se forman rocas ígneas extrusivas cuando el magma se derrama sobre la superficie de la tierra como coladas de lava o es arrojado al aire y depositado luego sobre la superficie para formar capas de rocas piroclasticas. Las rocas ígneas intrusivas se forman cuando el magma consolida debajo de la superficie de la tierra.

a).- Coladas de Lava.-

Las coladas de lava se desarrollan cuando el magma surge en la superficie de la tierra en forma relativamente suave con poca o ninguna acción explosiva. Son cuerpos ígneos tabulares delgados, en comparación con su extensión horizontal. La posición corresponde de modo general a la de la superficie sobre la cual han sido derramadas; sobre una planicie serán más o menos horizontales, pero sobre laderas pueden consolidar con una inclinación considerable.

La temperatura de las lavas recientemente arrojadas por el volcán pocas veces es mucho más elevada que el punto de fusión de aquéllas, y según la composición y contenido en gas oscila entre 600° y 1,200° C., siendo generalmente más alta en las lavas básicas, tales como el basalto. La movilidad de la lava fundida depende de los mismos factores. Las lavas ricas en sili

ce son de ordinario duras y viscosas y se solidifican en gruesas lenguas antes que puedan ir lejos, mientras que las lavas básicas tienden a correr libremente largas distancias. La velocidad de la corriente de lava depende de la movilidad y la pendiente, y, en algún caso local, puede alcanzar 80 km. por hora. Pero tales velocidades son muy raras y hasta es inusitado que lleguen a 16 kilómetros por hora, pues lo más frecuente es que el movimiento sea perezoso.

La superficie de las corrientes de lava recientemente consolidadas corresponde de ordinario a dos tipos contrastados, conocidos técnicamente con denominaciones hawaianas, aa (ah-ah) y pahoehoe. Las primeras o lavas en bloque se forman sobre coladas parcialmente cristalizadas de las cuales se escapan los gases en súbitas explosiones. Durante el avance, se rompe la costra solidificada en un conjunto irregular de bloques ásperos, dentados y escoriáceos. Las segundas o lavas cordadas surgen a una temperatura más elevada, se escapan de ellas escasamente diminutas burbujas de gas y la colada se solidifica con una costra lisa en un principio, pero que se arruga en formas viscosas y cordadas como las que adopta la pez líquida. Ocurre algunas veces que después de haberse solidificado la superficie superior y los bordes de una colada de este clase, los restos de la lava fundida se escapan, dejando un túnel vacío

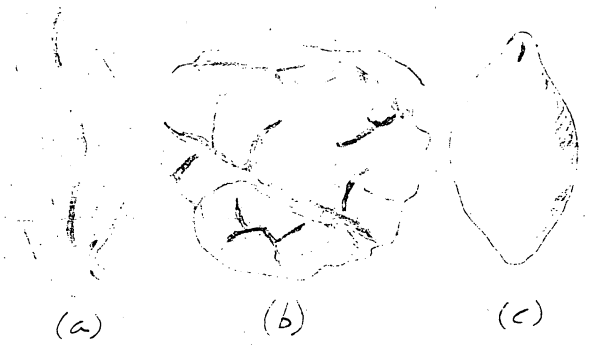
Cuando las lavas de tipo viscoso (o lavas cordadas) corren por el fondo del mar o por debajo de una cubietta de agua fría, se consolidan con una estructura análoga a un revuelto montón de almohadillas, habiéndose descrito con el apropiado nombre de lavas en almohadilla.

La estructura columnar aparece desarrollada en el interior de potentes masas de lava que han llegado a estabilizarse y que se consolidaron bajo condiciones particulares de estancamiento.

E Esto es característico de un modo especial en los basaltos de meseta, de grano muy fino, los cuales están relativamente libres de vesículas.

PRODUCTOS DE PROYECCION (PIROCLASTOS)

Los materiales fragmentados lanzados al aire se precipitan a diversas distancias del foco de erupción según su tamaño y la altura desde la cual inician su descenso. Los fragmentos más gruesos, que comprenden bombas, bloques de escorías y piedra pómez y bloques de rocas más antiguas, caen cerca de los bordes del cráter y bajan rodando por las pendientes internas o externas, formando depósitos de aglomerados o brechas volcánicas; este último término implica que los bloques se componen en buena parte de rocas del país procedentes d del basamento del volcán Las bombas volcánicas representan pellas de lava que que se solidificaron, al menos por fuera, antes de caer al suelo. Algunas de ellas revisten formas globulares, esferoidales o fusiformes debidas a la rápida rotación durante el vuelo; otras, de forma menos regular a causa de que fueron -



g 6 Bombas volcánicas
a y c, bombas fusiformes
b, bomba con corteza de pan

rígidas desde el principio, tienen grietas profundas en su superficie y por eso se les ha llamado bombas con corteza de pan.

Los fragmentos más pequeños, del tamaño de un chicharo o de una nuez, se llaman pavesas o lapilli (piedrecitas), según su estructura. Los materiales más finos todavía reciben el nombre de cenizas. Estas caen principalmente sobre los flancos y forman depósitos que, cuando están más o menos endurecidos, constituyen las cineritas, llamadas también tobas volcánicas y con menos propiedad tufos (galicismo que procede de la palabra tufa, adoptada en diversas lenguas extranjeras). Algunas veces, cristales de augita, feldespatos y otros minerales se precipitan de las nubes volcánicas en forma de lluvia y contribuyen a la formación de tobas. Las partículas más finas, que caen con el grosor de las de polvo, entre las que se incluyen agujas y astillas de vidrio, con frecuencia van a parar muy lejos del cráter antes de su caída. Cuando tales materiales son lanzados a grandes altitudes y arrastrados por el viento pueden ser transportados a lo largo de inmensas distancias. El polvillo microscópico procedente de la catastrófica erupción del Krakatoa, en 1883, dió la vuelta al mundo y su dispersión a través de la atmósfera fué la causa de las puestas de sol vivamente coloradas que se observaron durante los meses siguientes.

CONOS Y OTRAS ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS

Cuando las erupciones se llevan a cabo a través de una chimenea vertical, el orificio se ensancha en forma de cráter con flancos acompañados por explosión exterior y hundimiento interior. Por la acumulación de productos volcánicos alrededor de la abertura se va construyendo gradualmente una montaña cónica o en forma de cúpula. Los volcánes con la estructura familiar de cono y cráter se

llaman de tipo central, a causa de estar su actividad centralizada en torno a un conducto o chimenea. Entre las paredes de su cima truncada algunos volcanes poseen gigantescas depresiones que semejan cráteres enormemente ensanchados. Tal depresión puede haberse formado por derrumbamiento, de la primitiva superestructura o, con menos frecuencia, porque el volcán ha lanzado lejos su propia cima; y se la denomina caldera. El diámetro de una caldera es mucho mayor que el de la cabertura eruptiva y este contraste de tamaño es lo que lo distingue de un cráter. Casi todos los volcanes de nuestros días son del tipo central, pero en ciertos períodos del pasado geológico, y ocasionalmente durante los tiempos históricos, hubo volcanes del tipo de fisura que han derramado prodigiosos volúmenes de lava a través de largas fisuras de la corteza terrestre y han cubierto la comarca circundante de un manto de lava de extensión muchísimo mayor que las limitadas coladas de los volcanes de tipo central.

Algunos volcanes permanecen continuamente en erupción, pero en la mayor parte de los casos la actividad es intermitente, y algunas veces existen largos intervalos de reposos durante los cuales cesan los signos exteriores de actividad o se reducen a exhalaciones de vapor de agua y otros vapores a través de aberturas llamadas fumaroles. Estas, en una etapa posterior, pueden pasar a géiseres o manantiales calientes.

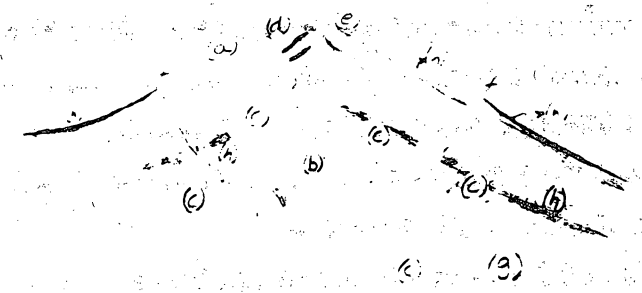
Las formas estructurales que resultan de la actividad volcánica dependen de la cantidad, proporción y carácter de las lavas y piroclastos arrojados. Algunos volcanes tienen una condición preferentemente efusiva, siendo la lava su producto principal; algunos son completamente explosivos; pero en la mayoría de los casos alternan estas dos clases de erupciones o se efectúan simultáneamente.

Los cráteres de explosión son meras perforaciones de la cortaza terrestre, señalados en la superficie por pequeños cráteres, rodeados por un anillo de piroclastos entre los cuales, como es natural, abundan fragmentos de rocas del país

Cuando la producción de materiales fragmentarios es suficiente, se forman conos de cenizas. El perfil está determinado por el ángulo natural de reposo de los materiales laxos que llueven alrededor del cráter Las cenizas finas forman ángulos de 30° a 35°, mientras que los fragmentos más gruesos cerca de la cima forman una pendiente de 40° y aún más.

Todos los grandes volcanes que rodean el Pacífico, y la mayoría de los - de todas partes, son de estructura compuesta y, salvo raras excepciones, su historia se extiende miles de años. Los conos compuestos son acumulaciones de capas sucesivas de cineritas estratificadas, que alternan irregularmente con coladas de lava en forma de lengua. Las lavas son generalmente andesitas, o de otro tipo, - que pueden correr con facilidad moderada. Estas lavas pueden derramarse a través de brechas en las paredes del cráter o de grietas radiales que puedan alimentar cráteres adventicios o parásitos - con frecuencia dispuestos en series lineales sobre los flancos. Al solidificarse el magma en las fisuras, se forman diques que ayudan a fortalecer la estructura.

Un volcán puede sufrir erupciones de tan catastrófica violencia que se - forme una vasta caldera, como si el volcán hubiese lanzado lejos de sí su cono terminal. Si la caldera se hubiese originado, en efecto, de este modo, fragmentos de los materiales ausentes formarían la mayor parte de los productos deppro-- yección o piroclastos representativos de la erupción. Pero cuando son raros tales fragmentos, como de ordinario ocurre, la única explicación es que la parte des-



(a) Cono principal
(b) Chimenea
(c) Diques
(d) Cráter de explosión
(e) Cono eruptivo
(f) [illegible] parásitos
(g) Rocas anteriores a volcán
(h) Coladas de lava

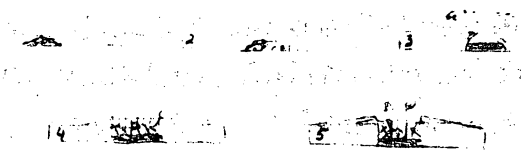


Fig 8 Formación de una caldera de subsidencia
1- Explosiones menores
2- Explosiones más violentas
3- Las explosiones violentas resquebrajan la cúpula
4- El cono se hunde en la cámara magmática
5- [illegible] nuevos conos eruptivos en el piso de la caldera

parecida del cono deberá encontrarse fuera de la escena. La mayoría de las calderas de volcanes compuestos parecen ser resultados del hundimiento total de la primitiva estructura en el espacio previamente ocupado por el magma, que fué rápidamente vomitado por erupciones explosivas de paroxísmica violencia. La emisión eruptiva reanuda, en general, más pronto o más tarde la actividad y construye un nuevo cono en el fondo de la caldera.

La forma de las estructuras volcánicas constituídas enteramente o de un modo dominante por corrientes de lava, depende sobre todo de la fluidez de ésta. Las lavas más ricas en sílice, tales como las riolitas, dacitas, traquitas y las correspondientes obsidianas, con frecuencia son tan viscosas que al correr no pueden alejarse mucho de la abertura. Se construyen entonces encima de la misma chimenea cúpulas de faldas empinadas y hasta alguna vez bulbosas. A causa de la obstrucción, el desarrollo ulterior ha de efectuarse principalmente por medio de adiciones desde el interior, con lo cual las capas más externas se agrietan y son empujadas hacia los lados por la expansión interior.

Lavas basálticas muy flúidas, de las cuales se escapan gases con tal facilidad, que la actividad explosiva se halla subordinada, se extienden en delgados mantos a través de grandes distancias. Por acumulación de sucesivas coladas en diversas direcciones se va construyendo una cúpula de amplia extensión con pendiente suave, que raramente excede de 6° a 8°. Los clásicos ejemplos de estos volcanes en escudo son los de las islas Hawai.

En muchas zonas volcánicas los volcanes centrales tienen una distribución lineal bien manifiesta, indicadora de que su alimentación se efectúa a lo largo de fisuras profundamente instaladas. Debido a los diversos grados de obstrucción,

el magma sube a niveles muy diferentes a lo largo de una fisura y finalmente irrumpe en puntos aislados donde la resistencia de los materiales situados encima es menor o donde el flujo de gas a través de las rocas consiguió mejor abrirse paso. Las aberturas así localizadas tienden después a persistir. En regiones sujetas a poderosa tensión cortical, sin embargo, las grietas que penetran más profundamente pueden producir canales ininterrumpidos para la rápida ascensión de enormes volúmenes de magma basáltico. Fluyendo casi tan libremente como el agua, la lava se derrama a través de largas grietas e inunda la comarca circundante, formando mantos cuya superficie es casi horizontal. Individualmente, estos mantos tienen por término medio solamente de 6 a 30 m de espesor, pero, por repetidas erupciones, desde enjambres de fisuras, se fueron acumulando a lo largo del tiempo vastas mesetas basálticas de centenares de metros de espesor.

En el transcurso de los tiempos históricos, Islandia ha sido una de las pocas regiones en que se han presenciado erupciones a través de fisuras. La mayor colada basáltica de los tiempos modernos irrumpió en Laki durante el verano de 1783. Partiendo de una grieta de 32 km de largo, torrentes de lava centellante, totalizando unos 120 km cúbicos, devastaron 564,6 kilómetros cuadrados del país, enviando largos arroyos en llamas a los valles situados más lejos. A medida que la actividad fué disminuyendo y haciéndose menos intensa, las obstrucciones fueron tapando la larga grieta, los gases se acumularon en vez de producir la libre efervescencia y se fueron formando pequeños conos a intervalos en los puntos desde los cuales la lava en su declinación continuó rezumando.

GASES VOLCANICOS

El vapor de agua es el más común de los gases volcánicos. Localmente, el vapor de agua puede provenir de un modo parcial y hasta total de las aguas subterráneas y lagos de los cráteres, pero, aún cuando se admitan estas fuentes superficiales, es todavía más evidente que el vapor de agua liberado en la mayoría de las erupciones es en gran manera de origen magmático. Pueden producir peligrosas inundaciones de barro cuando las lluvias torrenciales que descienden de las nubes de vapor de agua condensado van acompañadas de precipitación de cenizas o arrastran los sedimentos sueltos de las laderas abruptas de los volcanes.

Al lado del vapor de agua (del 60 al 90 por 100), los gases consisten, indicados por orden de abundancia, en anhídrido carbónico, nitrógeno, anhidrido sulfuroso y pequeñas cantidades de hidrógeno, óxido de carbono, azufre y cloro. Gases similares son liberados en todas partes de las lavas y fumaroles en actividad, juntamente con varios compuestos emparentados con ellos, tales como hidrógeno sulfurado, ácido clorhídrico y otros ácidos.

Una erupción explosiva es únicamente la manifestación final del poder propulsivo ejercido por los gases volcánicos. Puesto que la densidad del magma es reducida a causa de los gases que contiene en solución y todavía resulta más disminuida por la separación de burbujas gaseosas, el magma puede subir a niveles mucho más elevados, que de otro modo le sería imposible.

Otro efecto importante de los gases es el de aumentar la movilidad y prolongar la vida activa de magmas y lavas. Una lava, mientras todavía retenga parte del contenido original de gas, puede seguir fluyendo hasta que la temperatura descienda a 600° ó 700° C. Pero cuando la misma lava ha cristalizado y casi todo su gas ha sido expelido, se ha comprobado que la temperatura necesaria para reblandecerla de nuevo ha de ser de varios centenares de grados más. Se deduce de esto que la pérdida de gases implica una rápida consolidación. Las reacciones químicas de algunos gases entre sí y con el oxígeno pueden engendrar localmente cierta cantidad de calor en los centros volcánicos y de este modo ayudan a mantener temperaturas elevadas y hasta aumentarlas durante algún tiempo.

No se conoce todavía cuál es la fuente de los gases magmáticos, pero, por lo menos, como algunos magmas se han formado en la corteza a partir de rocas pobres en constituyentes gaseosos, es probable que los gases adicionales procedan de fuentes todavía más profundas. La ascensión de gases dotados de elevada energía procedentes de la materia primordial de la Tierra es, según la opinión de algunos vulcanólogos, la causa fundamental de la actividad volcánica.

IV-2.- Rocas ÍGNEAS INTRUSIVAS (PLUTONISMO).

Se dice que una roca ígnea es intrusiva cuando solidifica antes de aflorar en la superficie terrestre.

Su composición mineralógica es semejante a la de las rocas extrusivas, junto con las cuales forman las llamadas familias de rocas ígneas de las que ya se habló con anterioridad, pero difieren comunmente en su textura y estructura. Texturalmente la diferencia estriva principalmente en que en las rocas intrusivas son comunes los cristales bien desarrollados notables a simple vista (texturas porfídica y fanerítica) debido a que por solidificar en el interior de la corteza terrestre, su enfriamiento es más lento, con lo que se permite la cristalización.

Esto no ocurre con las rocas extrusivas en las que, debido a su rápido enfria-- miento en contacto con la admósfera la cristalización es por lo general muy pobre, formándose cristales sólo visibles al microscopio (textura afanítica).

Por otra parte su estructura (modo de ocurrencia) también es notablemente diferente.

PRINCIPALES ESTRUCTURAS IGNEAS INSTRUSIVAS.

La forma y posición de las rocas ígneas que fueran inyectadas entre las rocas corticales, depende ón gran parte de su relación con los planos de separación de las formaciones invadidas. Esto se ve más claramente allí donde los estratos han permanecido horizontales y sólo fueron inclinados o plegados suavemente. Uno de los vestigios más comunes de la actividad ígnea primitiva nos lo proporcionan las intrusiones en forma de paredes o murallas llamadas diques (fig. 9). En ellos el magma ascendió por fisuras aproximadamente verticales, - abriéndose paso y ensanchando la grieta a medida que ascendía, y de este modo, al enfriarse, quedó consolidado en forma de capa vertical de roca cuyas caras laterales, más o menos paralelas, cortan transversalmente los planos de estratificación. De tales intrusiones se dice que son transgresivas o discordantes.

En ciertas circunstancias, el magma puede abrirse paso a lo largo del espacio entre dos planos de estratificación, donde se instala por levantamiento de las rocas situadas encima. Las formaciones tabulares de rocas resultantes (fig. 10) se llaman mantos interestratificados. Las intrusiones que son paralelas a la estratificación adyacente se llaman concordantes.

Los diques varían mucho en su espesor, desde unos cuantos centímetros -

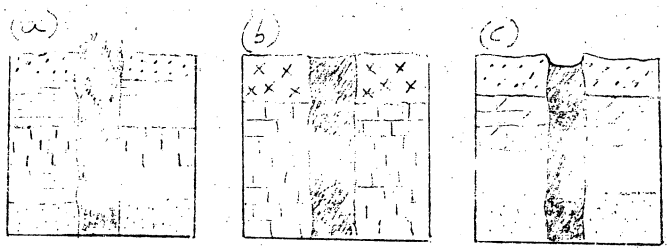


Fig 9.- Morfología de algunos diques en relación con la roca encajonante
a) Dique mas resistente a la erosion que las rocas encajonantes
b) Dique y rocas encajonantes de la misma resistencia
c) Dique menos resistente que las rocas de las paredes.

Fig. 10.- Manto interestratificado (en negro) en una sección sedimentaria de rocas plegadas.

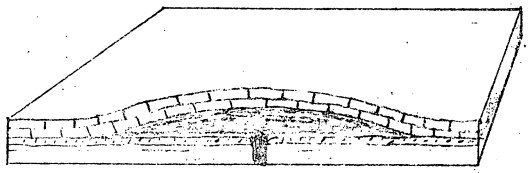


Fig. 11 Esquema de un lacolito ideal

Fig. 12.- Corte geológico esquematizado de un lopolito.

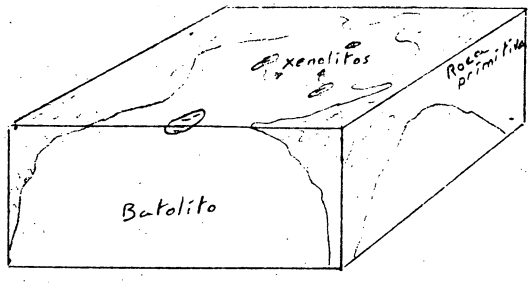


Fig 13.- Bloque diagramático ilustrando un batolito

hasta centenares de metros, pero lo más frecuente es que tengan de metro y medio a seis metros de ancho. Existe también una considerable variación en longitud, según vemos en la superficie, pudiendo oscilar entre algunos metros y varios kilómetros. Los diques son muy numerosos en algunas regiones de actividad ígnea.

En vez de estar tan extendido en superficie, en forma de capa relativamente delgada, un magma inyectado, sobre todo si es muy viscoso, puede encontrar más fácil levantar los estratos que se hallan encima plegándolos a modo de domo (fig. 11). Tales formas intrusivas están típicamente desarrolladas al este de las Montañas Rocosas, donde fueron identificadas por primera vez por Gilbett, quien las llamó lacolitos (del griego cisterna, y piedra).

Las intrusiones que en su conjunto son concordantes y tienen forma de platillo son los lopolitos (del griego vasija de poca profundidad). Los ejemplos mejor conocidos son de extraordinarias dimensiones (fig. 12). La curvatura de tan extensos mantos parece ser inevitable consecuencia del desplazamiento de enormes masas de magma desde los niveles profundos hasta los más elevados de la corteza.

Los batolitos (del griego, profundidad) son masas gigantescas de rocas esencialmente ígneas, en general compuestas de granitos o granodioritas, con cubierta sumamente irregular a modo de domo y paredes que se precipitan hacia abajo de manera que las intrusiones se ensanchan en profundidad y aparecen sin fundamentos visibles (fig. 13). Se presentan en el corazón de los sistemas montañosos de todas las edades geológicas, y son visibles dondequiera que la denudación haya llegado a suficiente profundidad. Aunque en detalle sus bordes sean marcada

mente discordantes con respecto a las rocas que los rodean, de ordinario están alargados paralelamente al rumbo general de los sistemas montañosos en que se encuentran. Algunos batolitos de América occidental se extienden centenares de kilómetros, siendo su anchura la décima parte de su longitud, o algo menos.

Las pequeñas intrusiones de tipo similar, pero menos alargadas, y con dimensiones superficiales de sólo unos cuantos kilómetros cuadrados o menos aún, las llaman stocks los autores de lengua inglesa. Muchos de ellos es probable sean retoños de batolitos subyacentes, de los cuales tan sólo las partes más elevadas han sido puestas al descubierto por la denudación. Con frecuencia los trabajos mineros han mostrado que ésta es la verdad.

El origen de los batolitos, debido principalmente a sus enormes dimensiones, plantea una serie de interrogantes si pretendemos explicar su modo de formación.

La hipótesis que primero se ocurre, es que el material que constituye el batolito procede de una cámara magmática semejante a la de cualquier volcan, pero dificilmente podemos imaginar un reservorio de magma de tales dimensiones, el cual por sí misma exigiría una explicación.

Por otra parte ¿Qué se hicieron las rocas corticales que primitivamente ocupaban el espacio donde ahora se extiende el batolito? Si el batolito se formó enteramente por la consolidación del magma que ascendió en masa desde la profundidad, entonces las rocas preexistentes han debido de desplazarse hacia arriba, hacia los lados o hacia abajo. Pero solamente una parte del espacio requerido pudo quedar disponible por tal procedimiento. Las observaciones de la cubierta y de las paredes han mostrado que los desplazamientos de las rocas

originarias hacia afuera pueden llegar a ocurrir realmente, pero sólo a una escala relativamente pequeña, como así había de ser inevitablemente alrededor de cualquier vasta masa en expansión.

El deslizamiento hacia abajo parece a primera vista más prometedor. Esto implica el desmenuzamiento de las rocas de la cubierta por expansión termal, el que sean desalojados los fragmentos por penetración de gases y lenguas de magma en las grietas, y finalmente, llega el momento de ser engolfados y de hundirse los bloques. Este proceso se llama obstrucción magmática. En los niveles superiores de stocks y batolitos se conservan con frecuencia inclusiones de las rocas preexistentes de todos los tamaños, más o menos intensamente metamorfizados. Se conocen con el nombre de xenolitos (del griego, extranjero). En profundidad, sin embargo, van haciéndose cada vez más pequeños y menos numerosos, y cada vez aumenta su analogía con las rocas graníticas que los engloban, hasta que finalmente acaban por desaparecer del todo. Es evidente que han sido incorporados al granito, y sigue en pie el problema del espacio.

La hipótesis de la obstrucción tropieza con otras serias dificultades. Si el magma granítico sube en gran volumen hacia la superficie por este procedimiento con frecuencia se abriría paso irrumpiendo netamente a través de la corteza para formar volcanes gigantescos con erupciones de riolita y obsidiana y con los correspondientes piroclastos. Pero esto muy rara vez ha ocurrido, según lo pueba claramente la retención de rocas de la cubierta primitiva. Además, si el magma granítico se elevara desde las profundidades en cantidades correspondientes al enorme volumen de los batolitos, éste sería, en mucho, el más abundante de todos los magmas. En este caso, la riolita sería la más abundante de

todas las rocas volcánicas. Pero no es así. Aunque el granito y la grnodiorita sean fácilmente las más comunes de las rocas plutónicas, el basalto es la más abundante de las rocas volcánicas. Este sorprendente hecho sugiere con vivos rasgos que el volumen del magma verdadero dedicado a la formación de batolitos era relativamente pequeño en comparación con su enorme masa

Puesto que no podemos resolver el problema del espacio hundiendo las rocas preexistentes o empujándolas hacia arriba o hacia los lados, se deduce que un elevado porcentaje del material de las rocas originarias debe de encontrarse allí, aunque ahora esté transformado en granito y tipos asociados de rocas ígneas. Todo argumento positivo en evidencia viene a favorecer este punto de vista. Al parecer, las rocas originarias no fueron invadidas por el magma granítico como tal magma, sino que se efectuó la granitización por medio de flúidos calientes ricos en gases. Estos empaparon las rocas, cambiando su composición y metamorfizándolas con una intensidad que llegó a alcanzar el ultrametamorfismo, con lo cual determinaron la generación de magma granítico in situ, y dieron mobilidad a la masa, de modo que se convirtió en ígnea.

IV-3.- PLEGAMIENTO DE LAS ROCAS.

Las fuerzas verticales u horizontales, de tensión o compresión, que actuan sobre la corteza terrestre pueden romper, desplazar o plegar las rocas produciendo en cada caso estructuras geológicas características.

Para comprender todos estos fenómenos y su representación en planos es necesarios exponer dos conceptos geológicos del máximo uso e importancia en geología:

Rumbo: es el ángulo existente entre una línea horizontal contenida en un estrato, falla o fractura y la línea norte sur (fig. 14).

Buzamiento o inclinación de un estrato falla o fractura: Es el ángulo que forma una línea de máxima pendiente, contenida en la estructura, forma con un plano horizontal (fig. 14).

El rumbo y buzamiento nos determinan la posición de cualquier punto de la estructura. Los símbolos utilizados para representar en un plano el rumbo y buzamiento de una capa se ilustran en la fig. 15 en que aparece también la representación escrita; en ella el primer miembro representa el rumbo y el segundo el buzamiento. Conviene hacer notar que rumbo y buzamiento siempre deben formar un ángulo de 90°, por lo que no es necesario dar también el rumbo del buzamiento sino solamente el cuadrante hacia el que buza.

Los pliegues que se encuentran con más frecuencia en la naturaleza se deben a fuerzas que actuan horizontalmente sobre una succesión de estratos si bien también existen pliegues debidos a fuerzas verticales aunque menos frecuentes.

Cuando las capas están plegadas en forma arqueada (con las capas más bajas o antiguas rodeadas por las más elevadas o recientes) la estructura se llama un anticlinal, a causa de que los estratos aparecen entonces inclinados a uno y otro lado del lomo. Cuando las capas están plegadas a modo de una artesa, o sea en forma cóncava (con las capas más antiguas envolviendo las más modernas), la estructura se llama un sinclinal, a causa de que los estratos de uno y otro lado "se inclinan juntos" hacia la quilla. Los lados o laderas de los pliegues se llaman flancos, pudiendo darse el caso, cuando se suceden anticlinales y sincli-

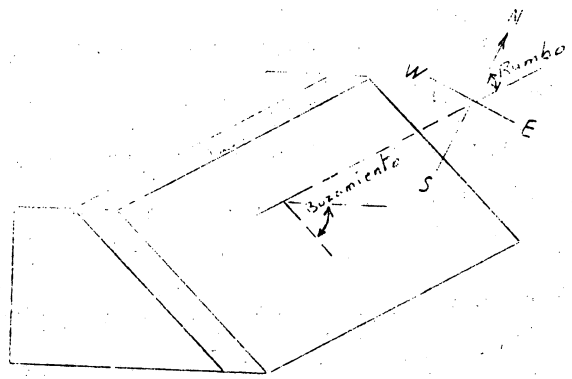


Fig. 14. Ilustración de rumbo y buzamiento

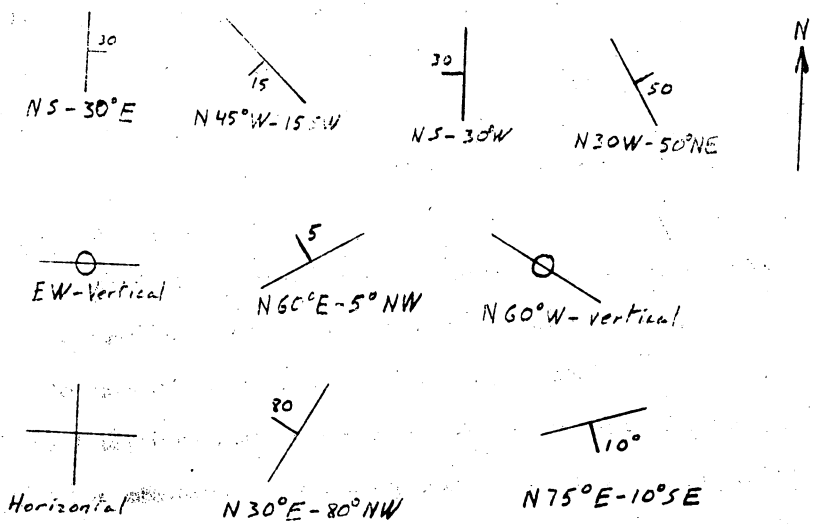


Fig 15 Representación del rumbo y buzamiento de estratos (Escrita y gráfica)

nales, de que un mismo flanco pertenezca a un anticlinal y al sinclinal contiguo. El plano bisector del ángulo diedro formado por los dos flancos de un mismo pliegue se llama plano axial, siendo el eje del pliegue para una capa determinada la intersección del plano axial con la superficie de dicha capa. Si el plano axial es vertical, el pliegue también es vertical o recto y, además, simétrico, coincidiendo entonces la cresta con el eje (fig. 16). Si el plano axial está inclinado, el pliegue será también inclinado; con respecto a la vertical, será asimétrico (fig. 17d.)

Si se sigue un pliegue a lo largo de su eje, tarde o temprano desaparece en lo que conoce como nariz del pliegue.

Además de los pliegues simétricos y asimétricos, existen otros varios tipos de pliegues (fig. 17 f):

Los pliegues tumbados (fig. 17 f) que son aquellos en que el plano axial esta en posición casi horizontal. En este tipo de pliegues se tiene la secuencia invertida en uno de sus flancos, pues se puede ver que si es anticlinal la capa más joven queda en la parte inferior y por tanto en el caso del sinclinal la mas antigua arriba, lo cual es la situación inversa a la normal.

Los pliegues isoclinales son aquellos que presentan sus flancos paralelos e igualmente inclinados (fig. 17 e).

Cuando el empuje que pliega los estratos actua con mas intensidad en una dirección, el pliegue es empujado según esta, y uno de los flancos se estira y lámina hasta romperse, produciendose un pliegue falla (fig. 17 g).

Si la fuerza sigue actuando con la fuerza necesaria, el flanco superior se desliza sobre el inferior, transladándose grandes distancias, con lo que se tendrán formaciones antiguas descansando sobre otras mas recientes, y formandose un plegamiento de cabalgamiento o cobijadura (Fig 17 h).

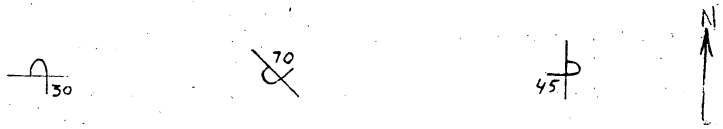


Fig 18. Representación de estratos invertidos.

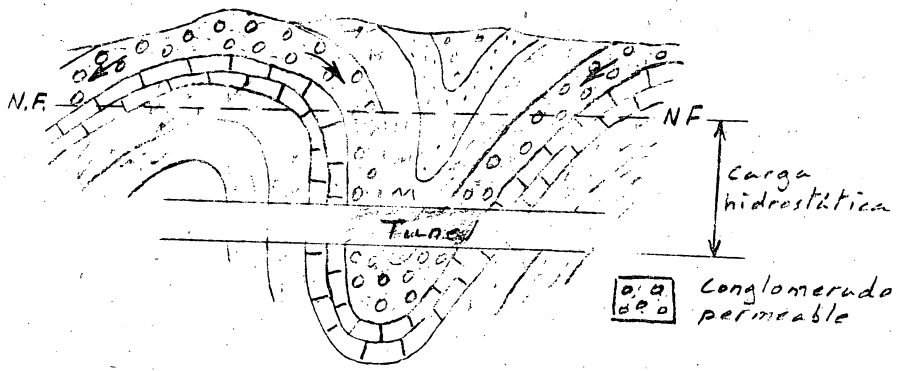


Fig 19. Perfil geológico donde se ilustra el corte de un tunel a un sinclinal con estratos impermeables. Se ha sombreado la vena en que se tendran entradas de agua a presion en la obra.

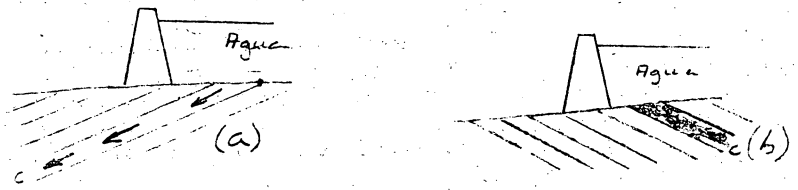


Fig. 20. Influencia de la estratificacion en presas
En (a) existe una capa permeable c que buza aguas abajo, con lo que se tendran perdidas en el embalse.
En (b) la capa c buza aguas arriba, en este caso el agua entra al estrato pero el agua no puede escapar del vaso

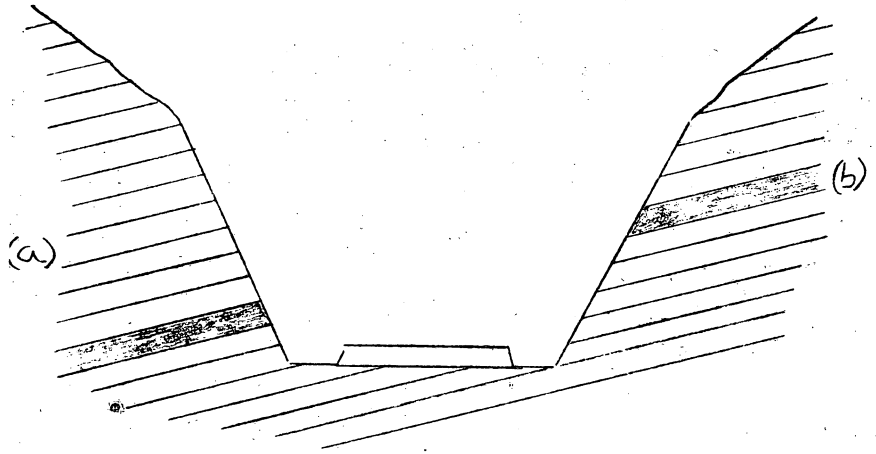


Fig 21. Corte transversal mostrando los taludes excavados para el paso de una carretera
El estrato sombreado es una capa arcillosa que presenta condiciones de estabilidad muy precarias. No obstante en la ladera (a) no habra problemas de caidas. En la ladera (b) por el contrario, todo el estrato que sobrepase a la capa arcillosa se encuentra en equilibrio inestable y es posible, sobre todo si se humedece la arcilla que se tenga un derrumbe sobre el camino.

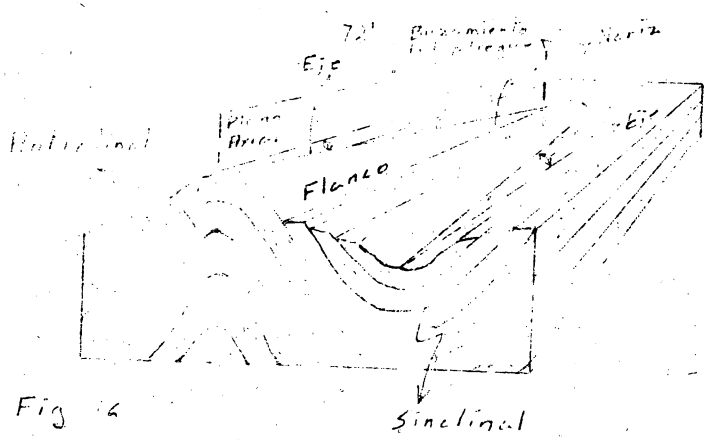


Fig. 16
Representación idealizada de un anticlinal y un sinclinal simétricos, mostrando sus partes principales.

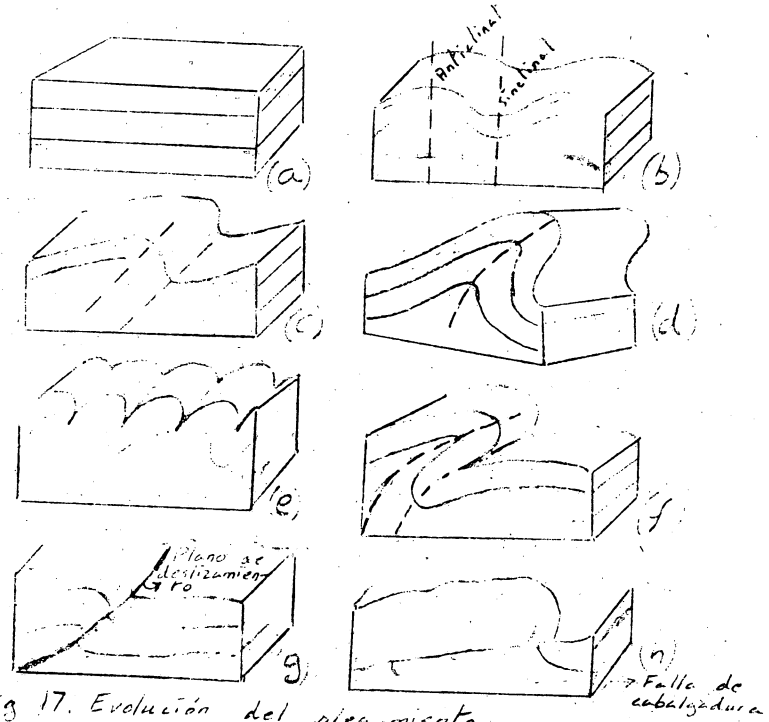


Fig 17. Evolución del plegamiento.
(a) Sedimentos horizontales; (f) Pliegues volcados o tumbados
(b) Pliegues simétricos
(c) Pliegues asimétricos
(d) Pliegues recostados
(e) Pliegues isoclinales
(g) Iniciación de una cabalgadura
(h) Pliegue de cabalgadura

El símbolo para representar el rumbo y buzamiento de un estrato invertido se representa como aparece en la fig. 18 en la que en el primer símbolo representa un estrato que originalmente buzaba hacia el norte, llegó a la vertical y continúo su giro, ahora en dirección sur, otros 60°. En el segundo caso se inclino originalmente hacia el SW, rebasó la vertical y continúo el giro otros 20°. En el tercer caso después de inclinarse hacia el oriente los primeros 90° continua el giro otros 45°.

La representación de los pliegues en planos puede verse en el tema que trata de las ilustraciones geológicas.

TRASCENDENCIA DEL PLEGAMIENTO EN INGENIERIA.

De entre los varios tipos de pliegues, son los sinclinales los de más trascendencia en ingeniería, como consecuencia de su capacidad para transmitir y acumular fluidos. Hay serios problemas de aguas que pueden resultar de la construcción y mantenimiento en servicio de túneles que cortan sinclinales en que existan estratos porosos. Si se pone de manifiesto un sinclinal de tal clase antes del período de proyecto, podría variarse la elevación del túnel planeado, con objeto de situarlo en estratos más secos. En trincheras profundas, para ferrocarriles o carreteras, se encuentran problemas de agua parecidos que puedan crear preocupaciones contantes a los ingenieros encargados de su conservación (fig. 19). A veces los pliegues pueden ejercer influencia en la elección del emplazamiento de una presa o embalse. Por ejemplo, cuando el vaso está emplazado sobre un monoclinal que contiene estratos permeables, hay casos en que pueden ser excesivas las filtraciones y escapes por las pendientes monoclinales aguas abajo. Si el monoclinal ofrece la inclinación de sus estratos aguas arriba, probablemente el vaso daría

lugar a escasas pérdidas, siempre, sin embargo, que el monoclinal contenga lechos impermeables, como, por ejemplo, margas (fig. 20).

Los estratos plegados pueden afectar considerablemente la estabilidad de taludes, como puede verse en la fig. 21. donde las condiciones de estabilidad resultan indudablemente mas favorables en el caso (a) que en el (b), sobre todo si recordamos que los planos de estratificación son por lo general zonas de debilidad que favorecen los deslizamientos.

IV-4.- FRACTURAMIENTO DE LAS ROCAS

Las rocas están característicamente rotas por fracturas lisas conocidas como diaclasas [redacted]. Las diaclasas se pueden definir como planos divisorios o superficies que dividen las rocas, y a lo largo de los cuales no hubo movimiento visible paralelo al plano o superficie. Aunque la mayoría de las diaclasas son planos, algunas son superficies curvas. No hubo movimiento visible paralelo a la superficie de la diaclasa; de otro modo sería clasificada como una falla. Sin embargo, puede existir movimiento perpendicular a la superficie de la diaclasa, y producir una fractura abierta.

Las diaclasas pueden tener cualquier posición; algunas son verticales, otras son horizontales, y muchas están inclinadas en ángulos variables. El rumbo y la inclinación de las diaclasas se miden de la misma manera que en la estratificación.

Las diaclasas difieren mucho en tamaño. Algunas tienen solamente unos pocos metros de largo, pero las observaciones realizadas en canteras demuestran que otras se pueden seguir por decenas o centenares de metros a lo largo del rumbo, y por distancias similares hacia abajo En regiones montañosas se pueden observar diaclasas que tienen centenares o aún miles de metros de longitud, tanto en el sentido

del rumbo como en el de la inclinación.

Una diaclasa nunca se encuentra sola. El intervalo entre ellas puede ser de cientos de metros o solamente de unos pocos centímetros.

Las diaclasas se pueden clasificar ya sea geométricamente, ya sea genéticamente. Una clasificación geométrica es estrictamente descriptiva y comparativamente fácil de aplicar, pero no indica el origen de las diaclasas. Una clasificación genérica es más significativa, pero, en muchos casos es difícil de aplicar.

En una clasificación geométrica, las diaclasas se puden clasificar sobre la base de su posición con respecto a la estratificación o alguna estructura similar de los estratos que cortan. Las diaclasas de rumbo son aquellas cuyo rumbo es paralelo o esencialmente paralelo al rumbo de la estratificación de una roca sedimentaria, a la esquistosidad de un esquisto, o a la estructura gnéisica de un gneis. En la fig. 22 en la cual la estratificación se indica en negro, BDEF y MNO son diaclasas de rumbo. Las diaclasas de inclinación son aquellas cuyo rumbo es paralelo o esencialmente paralelo a la dirección en la cual se inclina la estratificación, esquistosidad, o estructura gnéisica. En la fig. 22 ABCD y GHI son diaclasas de inclinación. Las diaclasas oblicuas o diagonales son aquellas cuyo rumbo está entre el rumbo y la dirección de la inclinación de las rocas asociadas. En la fig. 22, PQR y STU son diaclasas oblicuas. Las diaclasas de estratificación son paralelas a la estratificación de las rocas sedimentarias asociadas. En la fig. 22 JKL es una diaclasa de estratificación.

Las diaclasas se puden clasificar de acuerdo con su rumbo. Es posible, entonces, hablar del juego norte sur, del juego nordeste o del juego este oeste. En algunas regiones puede haber varios juegos norte sur; un juego puede ser vertical, otro puede inclinarse 40 grados al este, y un tercero puede inclinarse 60 grados al oeste.

Para determinar el número de juegos presentes, las diaclasas pueden ser representadas en un mapa o mediante algún diagrama adecuado.

CLASIFICACION GENETICA

En muchos casos, es difícil determinar el origen de las diaclasas. No es siempre posible distinguir diaclasas de tensión, que se forman perpendicularmente a fuerzas que tienden a separar las rocas, de diaclasas de cizalla, que se deben a fuerzas que tienden a deslizar una parte de la roca contra la otra adyacente.

Las diaclasas de tensión debidas a una disminución de volumen son uno de los tipos más fáciles de reconocer. La disyunción columnar en basaltos es de este origen (fig. 23); éste es también el origen de las grietas de desecación y de las diaclasas en loess. El enfriamiento de una capa horizontal de basalto, ya sea una colada o un filón capa, es un ejemplo ideal. El basalto solidifica a alrededor de 1.000° C, y durante el enfriamiento subsecuente se contrae. Las fuerzas tensionales resultantes actúan principalmente en el plano horizontal y son iguales en todas direcciones dentro de éste. Cuando eventualmente se produce la ruptura, aparecen irradiando desde numerosos centros - tres fracturas verticales que forman entre ellas ángulos de 120 grados. Si los centros están distribuidos uniformemente, las fracturas limitan columnas hexagonales verticales. En realidad, por supuesto, la perfección de las columnas hexagonales difiere mucho, y depende de múltiples factores. En muchos casos, las fracturas están distribuidas tan irregularmente que la forma hexagonal es irreconocible.

Teóricamente, por supuesto, el enfriamiento de una lámina horizontal de basalto sólido es un problema tridimensional. Sin embargo, debido a la gravedad, la tensión no se desarrolla necesariamente en la dirección vertical.

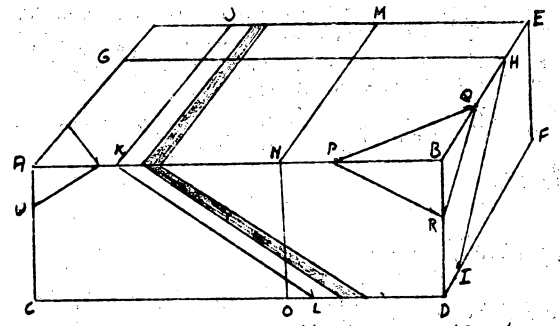


Fig 22. Clasificación geométrica de diaclasas. La banda negra representa la estratificación. ABCD y GHI son diaclasas de inclinación; BOEF y MNO son diaclasas de rumbo. JKL es de estratificación; PQR y STU son diaclasas diagonales.

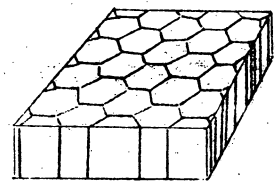


Fig 23. Fracturas columnales en el basalto.

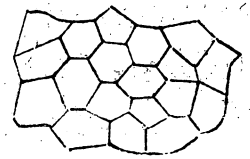


Fig. 24. Polígonos de desecación de lodos.

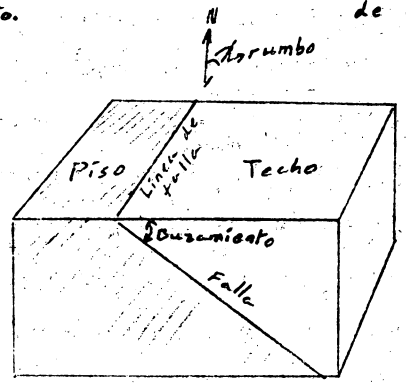


Fig 25. Terminología para un plano de falla.

Sin embargo, aún en la dirección vertical se producen tensiones, y las columnas hexagonales pueden estar cortadas por fracturas transversales horizontales.

Las grietas de desecación se forman debido a fuerzas similares a las que actúan en una lámina de basalto sólido en enfriamiento. En este caso, sin embargo, la contracción se debe a la pérdida de agua durante la desecación del fango húmedo. (fig. 24).

La representación en planos de las diaclasas se muestra en el tema de ilustraciones geológicas.

Direcciones preferente y subordinada: Las rocas ígneas pueden romper con mayor facilidad a lo largo de dos direcciones denominadas preferente y subordinada. El plano según el cual rompe la roca con máxima facilidad, o sea el plano preferente, puede ser casi vertical o casi horizontal. El plano, o dirección, preferente es, por lo general, casi perpendicular con respecto al subordinado, y coincide, muchas veces, con la dirección de los cruceros longitudinales. El plano, o dirección, subordinado es paralelo a los planos de exfoliación de la roca. Al explotarla en cantera, el plano de mayor dificultad de separación se denomina el plano duro o difícil. Los tres sistemas de planos o direcciones que acabamos de mencionar son casi perpendiculares entre sí. Su existencia se atribuye a menudo a la presencia de fisuras microscópicas originadas por enfriamiento o al paralelismo entre partículas planas de mica y feldespato (-orientación-). En las rocas sedimentarias, la dirección preferente coincide, por lo general, con el lecho de estratificación ocasionado por los esfuerzos cortantes en forma semejante a lo que ocurre en los planos de contacto entre dos vigas de madera.

IV-5.- FALLAS

Las fallas son rupturas a lo largo de las cuales las paredes opuestas se han movido la una con relación a la otra. La característica esencial es el movimiento diferencial paralelo a la superficie de la fractura. Algunas fallas tienen sólo unos pocos centímetros de largo, y el desplazamiento total se mide en fracciones de centímetro. En el otro extremo hay fallas que tienen centenares de kilómetros de longitud, y cuyo desplazamiento mide kilómetros, o aun decenas de kilómetros.

El rumbo y la inclinación en una falla se miden de la misma manera que en la estratificación o en las diaclasas.

El bloque que está encima de la falla se denomina techo (fig. 25) y el que está debajo piso. Es obvio que las fallas verticales no tienen ni techo ni piso.

Aunque muchas fallas son bien definidas, en múltiples casos el desplazamiento no está confinado a una fractura única, sino que está distribuido a través de una zona de falla que puede tener centenares a aun miles de metros de espesor. La zona de falla puede consistir en cantidad de pequeñas fracturas entrelazadas, o puede ser una zona confusa de brecha o milonita. Se producen fallas distributivas, si el movimiento diferencial tiene lugar por pequeños desplazamientos sistemáticos a lo largo de un gran número de fracturas muy próximas entre sí.

La intersección de una falla con la superficie de la tierra se conoce como línea de falla, traza de falla, o afloramiento de falla (fig. 25). En la mayoría de los casos, la línea de falla, tal como aparece sobre un mapa, es razonablemente recta o algo sinuosa. Sin embargo, si la inclinación de la falla es baja y el relieve topográfico es alto, la línea de falla puede ser sumamente irregular.

El movimiento total o largo de la falla puede ser translacional o rotacional. En la fig. 26, 26 A, los diagramas A y AB y B filas muestran movimientos translacionales, mientras que los diagramas C y CD y D filas muestran movimientos rotacionales.

En el movimiento translacional no hubo rotación de los bloques en relación uno con otro. Todas las líneas rectas sobre los lados opuestos de la falla y fuera de la zona de la falla que eran paralelas antes del desplazamiento son paralelas después.

En la fig. 26 26 A, los puntos, y a y, que eran contiguos antes de la falla, han sido separados así. El bloque de derecha ha movido directamente hacia abajo, a lo largo de la línea inclinada de la falla, en relación con el bloque de la izquierda. Las líneas y c y d, c que eran paralelas antes de la falla son también paralelas después. En la fig. 26 B, el bloque de derecha ha movido diagonalmente hacia abajo; las líneas y c y d, c paralelas antes de la falla, son también paralelas después.

Los movimientos rotacionales en sí, de ellos, en la línea siguiente, sobre los lados opuestos de la falla y fuera de la zona de la falla que eran paralelas antes del desplazamiento, no son más después de producirse éste. En la fig. 26 C, el bloque de derecha ha movido hacia abajo en relación con el de la izquierda, pero el desplazamiento ha sido hacia el frente; en un punto no ha habido desplazamiento, pero y b y a eran contiguos antes de la falla. Las líneas y a y a d, paralelas antes de la falla, no son más después de producirse éste. En la fig. 26 D, parte del bloque de derecha ha movido hacia arriba en relación con el bloque de la izquierda, pero parte del bloque ha movido hacia -

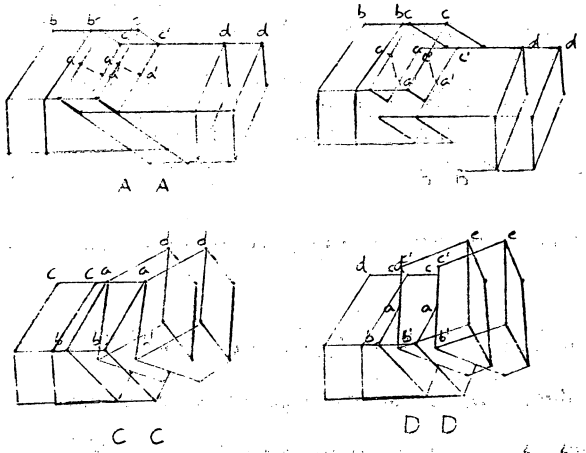


Fig. 26. Movimientos translacionales y rotacionales

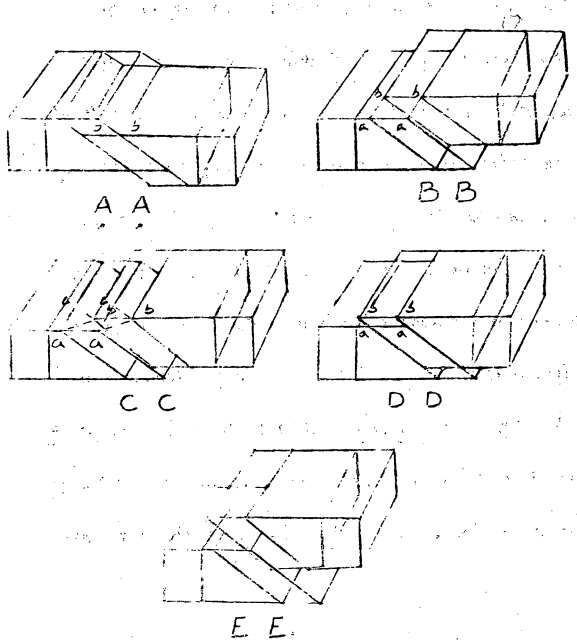


Fig. 27. [illegible]

abajo. Las líneas dc y c'e, que eran paralelas antes de la falla, no lo son más después de ésta.

En un sentido, todas las fallas tienen una cierta cantidad de movimiento rotacional. El desplazamiento aumenta o disminuye a lo largo del rumbo de todas las fallas, y los bloques deben rotar algo en relación unos con otros. Sin embargo, si la rotación no es demasiado grande, los movimientos en cualquier lugar se pueden tratar como si la falla fuera translacional.

Ha sido necesario idear una terminología sumamente elaborada para describir el movimiento a lo largo de fallas y los efectos sobre los estratos afectados. La terminología ha sido creada, principalmente, para movimientos translacionales, pero puede usarse, con modificaciones, para movimientos rotacionales.

Las fallas, en sí mismas, no ofrecen nunca evidencia directa sobre cuál es el bloque que se movió realmente. Así, en la fig. 26 A, el bloque de la derecha puede haber bajado y el de la izquierda puede haber permanecido estacionario, o el de la izquierda puede haber subido y el de la derecha, bajado; ambos bloques pueden haber descendido, pero el de la derecha más que el de la izquierda, o ambos pueden haber subido, pero el de la izquierda más que el de la derecha. La terminología se basa principalmente en movimientos relativos, debido a que, en la mayoría de los casos, no se dispone de ninguna evidencia referente a los movimientos absolutos.

La fig. 27 ilustra algunas de las varias clases de movimientos relativos que pueden tener lugar a lo largo de una falla translacional. En el diagrama A, el techo se ha movido directamente hacia abajo en relación con el piso; en B, el techo se ha movido paralelamente al rumbo; en C, el techo se ha movido hacia abajo diagonalmente sobre el plano de falla; en D, el techo se ha movido directamente hacia arriba, y en E, el techo se ha movido diagonalmente hacia arriba sobre el plano de falla.

El término desplazamiento se usa para indicar el movimiento relativo de puntos anteriormente adyacentes sobre lados opuestos de la falla, y se mide sobre la superficie de la falla. El desplazamiento neto (ab de la fig. 27) es el movimiento total; es la distancia, medida sobre la superficie de la falla, entre dos puntos anteriormente adyacentes situados sobre parades opuestas de la falla. Se define en términos de la distancia y del ángulo que forma con alguna línea en el plazo de falla, tal como una línea horizontal, o una línea paralela a la dirección de la inclinación. En la fig. 27 C, el desplazamiento neto ab forma un ángulo de 35 grados con una línea horizontal en el plano de falla.

El desplazamiento de rumbo es la componente del desplazamiento neto, paralela al rumbo de la falla; en la fig. 27 C es ac. El desplazamiento de inclinación es la componente del desplazamiento neto, paralela a la dirección de la inclinación del plano de falla; es bc en la fig. 27 C. En las figs. 27 A y 27 D, el desplazamiento de rumbo es cero. En la fig. 27 B por cuanto al movimiento es diagonal, aparecen las dos componentes del desplazamiento neto: el desplazamiento de inclinación ac y el desplazamiento de rumbo bc.

Se llama desplazamiento horizontal de una falla a la componente de su desplazamiento neto sobre un plano horizontal y desplazamiento vertical a la componente del mismo desplazamiento sobre un plano vertical.

Ya hemos mencionado que en las fallas no siempre se tendrán todos los tipos

de desplazamientos y que en otros casos el neto puede coincidir con otro.

Si bien como vemos existen numerosas clasificaciones para la definición del movimiento de una falla en la práctica puede resultar difícil establecerlas y es común que solamente se le denominen fallas normales o inversas, llamándose normal a aquella falla en la cual el techo ha descendido con respecto al piso, e inversa a aquella en que el techo ha ascendido con respecto al piso.

Las fallas normales, que son las mas frecuentes se originan por fuerzas de tensión y tienen por lo general buzamientos fuertes.

Las inversas se deben a fuerzas de compresión y presentan buzamientos más tendidos.

La representación de fallas en planos aparece en el inciso de ilustraciones geológicas.

EFECTOS DE LAS FALLAS SOBRE LOS ESTRATOS DISLOCADOS.

Dada la gran variedad de situaciones que se pueden presentar nos limitaremos a representar gráficamente unas cuantas situaciones simplificadas, representando cada caso en dos bloques el primero inmediatamente después de fallamiento y el segundo cuando la erosión ha nivelado el terreno (figs. 28 y 29)

TRASCENDENCIA DE LAS FALLAS EN INGENIERIA.

Las fracturas en conjuntos pétreos, acompañadas de desplazamientos diferenciales a ambos lados de la fractura, establecen a menudo discontinuidad en los emplazamientos, independientemente de cuáles sean el rumbo y la pendiente de la roca. La búsqueda de las fallas no siempre es eficaz, y como consecuencia no es raro que las fallas se pongan de manifiesto a veces durante el período de construc

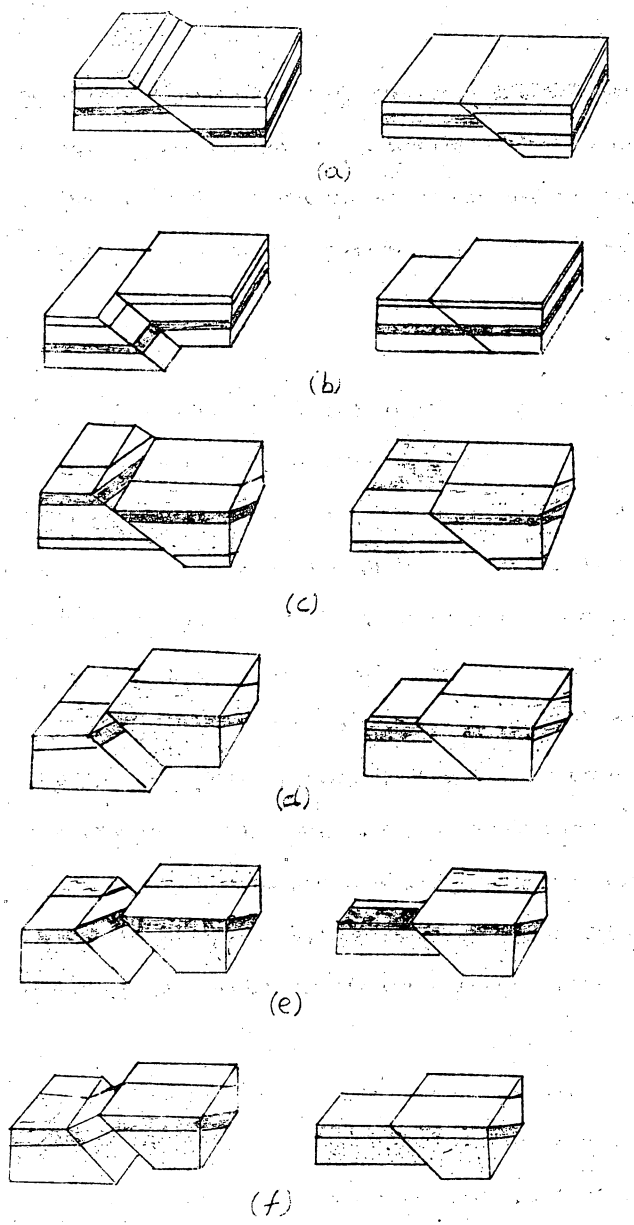


Fig. 28 [illegible] de las fallas sobre estratos dislocados.

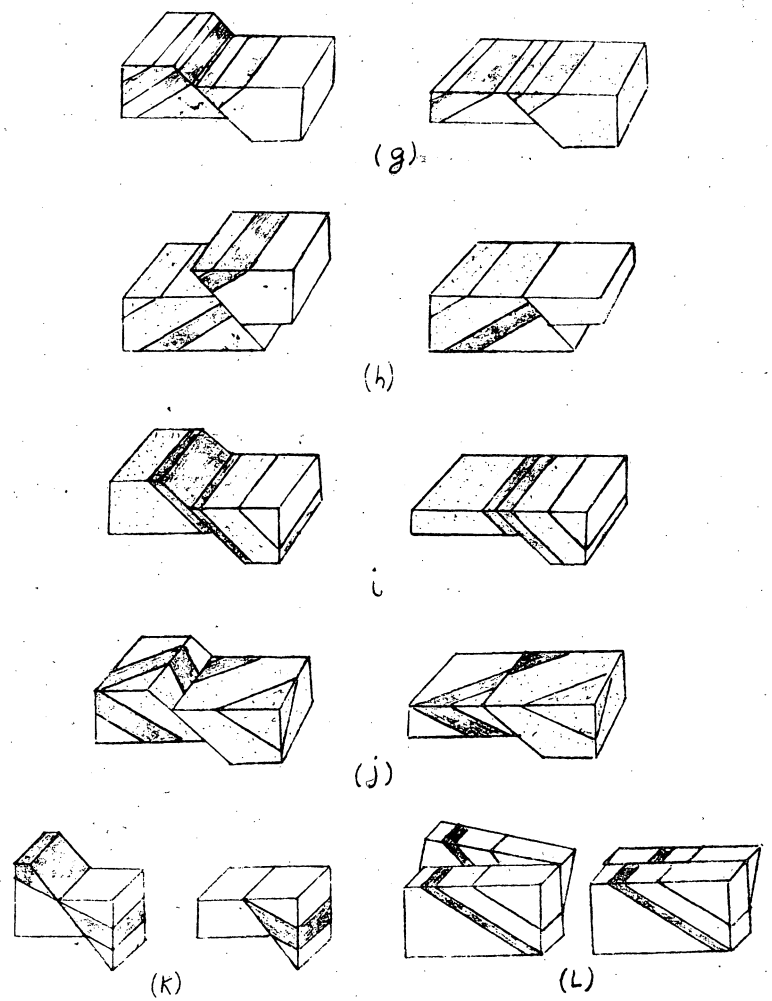


Fig. 29

ción o más tarde, lo que trae como consecuencia un incremento considerable del costo de la construcción. Las fallas pueden permanecer ocultas hasta profundidades considerables, y si el piso de la excavación aparece recortado por fallitas que contienen roca milonitizada en estado de polvo o de brecha, lo más aconsejable, en la mayor parte de los casos desde ambos puntos de vista técnico y económico, es abandonar el emplazamiento. En otros casos, si se manifiesta una falla cuando el fondo de la excavación ha alcanzado casi el nivel más profundo del proyecto, se podría, a pesar de todo, utilizar el emplazamiento, eliminando una gran parte de la roca fallada, aunque evidentemente con considerable aumento tanto en el costo de la obra en roca como de la obra en hormigón.

Constituye un punto de gran preocupación para el ingeniero la determinación de si una falla (en la localidad elegida para emplazamiento de una construcción) es -activa-, -inactiva- o -pasiva-. Fallas activas son aquellas en las que han acontecido desplazamientos durante la historia conocida del hombre, bien por transmisión escrita o verbal, y en las cuales pude esperarse que se produzcan movimientos en cualquier momento (por ejemplo, la famosa falla de San Andreas, y otras, en California). Fallas inactivas o pasivas son las rupturas de las que no hay recuerdo de movimiento alguno, y en las que se supone que su estado es estático y que probablemente permanecerá estático. En algunas localidades, como ocurre en Nevada, se encuentran ambos tipos. Desgraciadamente, no es posible afirmar de manera definitiva, desde un punto de vista ingenieril (ni geológico tampoco), si una falla en apariencia inactiva va a permanecer siempre así. La falla puede volver a abrirse, bien a causa de una nueva acumulación de tensiones en esa localidad o como consecuencia de vibraciones originadas por terremotos. Pero tranquiliza saber que en

los Estados Unidos no se conoce caso alguno de fallos de presas construidas a través de fallas activas. Lo que no quiere decir tampoco que tal clase de accidentes no pueda ocurrir.

De entre los productos básicos del fallamiento la harina milonítica es quizás el que origina más preocupaciones en problemas de cimentación. Por lo general, constituye un material impermeable que puede dificultar o detener los movimientos de las aguas subterráneas de uno al otro lado de la falla y crear de esta manera cabezas o cargas hidrostáticas desastrosas, como puede ocurrir si se las encuentra en la excavación de un túnel. También puede reducir el coeficiente de fricción al resbalamiento a lo largo del plano de falla; de manera que cualquier carga pesada (tal como una edificación) colocada sobre lechos que se apoyen en una junta con limo de falla puede ocasionar, con su peso, deslizamiento lateral, y causar, finalmente el fallo. La presencia de brechas blandas puede dar origen a -apretones- repentinos en un túnel que atraviese una falla.

V.- MODELADO DE LA CORTEZA TERRESTRE.-

Los procesos estructurales que tratamos en el Capítulo IV, crean formas topográficas positivas, pero estas formas tienen una mayor exposición al intemperismo (Cap. III) y a la erosión.

Se llaman agentes erosivos a aquellos que transportan y depositan los materiales removidos por el intemperismo.

Resumiendo: mientras los procesos epeirogénicos crean zonas montañosas, el intemperismo y la erosión tienden a destruirlas.

Los principales agentes erosivos son el agua, en forma de ríos, mares o glaciares (estos últimos no los trataremos por no tener importancia en México) y el viento.

V-1.- RIOS.

Definimos el escurrimiento, como la parte de la precipitación que forma corrientes superficiales. El escurrimiento consta de dos partes: el escurrimiento superficial que es la parte del escurrimiento que fluye sobre la superficie hacia el río más próximo, y el escurrimiento de las aguas subterráneas, que es aquella parte del escurrimiento que sigue su curso bajo la superficie del suelo antes de alcanzar un río.

El agua corriente (combinada con los procesos de desgaste de masas), es el agente más importante por medio del cual la tierra se erosiona, y es también el principal medio de transporte de los sedimentos resultantes de tal erosión.

Parte de los sedimentos fluviales se depositan sobre el terreno, cuando menos temporalmente. El aluvión, nombre con el que se designan en general to

dos los sedimentos depositados por las corrientes fluviales en medios terrestres, existe en grandes cantidades y otras mayores aún, se han transformado en rocas sedimentarias. Sin embargo, gran parte de los sedimentos es transportada al mar, en donde finalmente se deposita. Las plataformas continentales constan en parte de rocas constituidas por dichos sedimentos. En realidad, las corrientes fluviales se cuentan entre los principales agentes que han acumulado las rocas de la corteza terrestre.

En resumen, las corrientes son importantes en geología, porque: (1) en combinación con el desgaste de masas son los principales escultores del modelado terrestre, y (2) son uno de los principales agentes por medio de los cuales se depositan los sedimentos que posteriormente llegan a convertirse en rocas sedimentarias. Desde el punto de vista económico las corrientes también son importantes porque: (1) constituyen una significativa y cada vez mayor fuente de abastecimiento de agua, (2) constituyen una fuente de energía hidráulica, que, aunque es relativamente pequeña, es esencial, [redacted], [redacted] y (3) el aluvión es generalmente un receptáculo subterráneo donde se almacena el agua. Otros aspectos económicos de las corrientes son: (1) cuando hay inundaciones, las corrientes pueden causar daños que, para evitarse requieren medidas para controlar las avenidas, y (2) el escurrimiento del agua de lluvia sobre los pastizales y campos de cultivo es, probablemente, la causa principal de la pérdida de suelos valiosos por efecto de la erosión.

III. FLUJO DE LAS CORRIENTES Y ENERGIA DE LAS MISMAS.

Una corriente puede definirse como un cuerpo de agua que acarrea partículas de roca y fluye pendiente abajo a lo largo de un curso definido. El curso es

el canal o cauce de la corriente y las partículas de roca son una parte esencial de la corriente en sí.

Gradiente y velocidad. En una determinada parte de su curso una corriente es la cantidad de agua que fluye pendiente abajo a una cierta velocidad media. La pendiente medida a lo largo de la corriente se designa como el gradiente de la misma. Los gradientes de algunas corriente de montaña sobrepasan a los sesenta o aun ochenta metros por kilómetro, mientras que algunas partes del curso inferior del río Mississippi tienen gradientes de menos de 10 centímetros por kilómetro. Los gradientes en muchas corrientes son del orden de 2 a 4 metros por kilómetro.

La velocidad se expresa generalmente en términos de metros por segundo, o kilómetros por hora. Las velocidades de más de 30 km por hora son excepcionales; por otra parte, la velocidad en algunas corrientes es de menos de 800 metros por hora. En la mayor parte de las corrientes fluviales, las velocidades fluctúan entre estos valores, quedando probablemente la mayoría de ellas cerca del límite inferior citado.

Flujo de la corriente: turbulencia. Se ha demostrado en el laboratorio, por medio de indicadores de colores, que en un cuerpo de fluido que se mueve muy lentamente, las partículas de agua se desplazan en cursos paralelos. Esta clase de flujo es el llamado flujo lineal (o laminar), que se define también como el flujo sin turbulencias. Como veremos más adelante, el movimiento del agua del subsuelo y también el de los glaciares, es generalmente de este tipo. Sin embargo, el agua en casi todas las corrientes, naturales fluye tan rápidamente que las líneas de corriente se desvían, llegando a ser extremadamente confu-

sas y a formar remolinos o turbulencias. Podemos por lo tanto, definir el flujo turbulento simplemente como aquel que se caracteriza por formar remolinos.

Sin embargo, la turbulencia no es igualmente intensa de lado a lado de la corriente, ni de la superficie al fondo de la misma. Por lo general es más grande en dos lugares: la cima central de la sección vertical, en donde la velocidad es mayor y cerca del lecho de la corriente, en donde el contacto entre el agua y el fondo provoca turbulencia.

Empleo de la energía de la corriente. La mayor parte de la turbulencia se desarrolla por fricción interna, - esto es - por la fricción entre las partículas del agua. En cambio, parte de la turbulencia cerca de los lados y del fondo - del cauce se desarrolla por la fricción externa contra el cauce mismo y contra - las partículas de roca sueltas. Parte de esta actividad mueve las partículas de - roca y erosiona el cauce, lo cual constituye en sí un trabajo geológico.

Gran parte de la energía de una corriente se disipa como turbulencias; sólo una pequeña proporción se consume erosionando el cauce y transportando partículas de roca. Sin embargo, a pesar de que la proporción es pequeña, el trabajo geológico realizado por las corrientes durante largos períodos de tiempo es - muy grande, como lo demuestran las enormes dimensiones de algunos valles y los grandes volúmenes de material aluvial que existe sobre la superficie de la Tierra.

REGIMEN DE UNA CORRIENTE.

Una corriente tal como un canal de irrigacion, que fluye en un cauce de concreto,* puede ser estudiada independientemente del mismo porque éste apenas es alterado por la corriente. Sin embargo, la mayoría de las corrientes naturales escurren a través de cauces que constan parcial o totalmente de aluvión o de -- otros materiales sueltos en movimiento, por lo cual los cauces se están alterando

continuamente. Debido a que la corriente y el canal están estrechamente relacionados y cambiando continuamente, se les debe considerar juntos como un sistema interrelacionado.

Factores en el régimen. La economía del sistema depende de una continua intercombinación de cuatro factores:

1.- Gasto (la cantidad de agua que pasa por un punto en una unidad de tiempo). El gasto se expresa generalmente en metros cúbicos por segundo.

2.- Forma y tamaño del canal o cauce.

3.- Carga (La cantidad de material que acarrea la corriente). La carga consiste en partículas de roca de varios tamaños, además de materia en solución.

Velocidad.

Estos factores se miden sistemáticamente en ciertos puntos a lo largo de - las corrientes, tanto grandes como pequeñas, con el fin de controlar las inundaciones, para irrigación, abastecimiento de agua, etc.

El gasto se obtiene multiplicando el ancho del canal por su profundidad y por su velocidad, o dicho de otra manera, la descarga es igual al área de la sección transversal del cauce multiplicada por la velocidad de la corriente.

Cuando el gasto cambia (y esto sucede continuamente), el producto de los términos involucrados en la fórmula debe cambiar proporcionalmente. Aunque la carga no está incluida en la fórmula, es obvio que cambia también.

Se puede llegar a la conclusión de que una corriente y su cauce están relacionados íntimamente y que el cauce responde en tal grado a los cambios en - la energía de la corriente que puede decirse que el sistema está en cualquier - punto, prácticamente en equilibrio. Cuando al crecer el volumen de agua, au-

menta la energía de la corriente, ésta erosiona y agranda su cauce y arrastra el exceso de carga hasta que se equilibra el aumento en la descarga. Cuando la energía disminuye, parte de la carga se asienta y el canal se hace menos profundo, quedando una vez más en equilibrio en relación con la cantidad de agua que pasa a través de él.

Cambios que se observan corriente abajo. Observando los sucesos en un solo punto, hemos visto que una corriente ajusta su cauce aproximadamente a las condiciones de estabilidad en todo tiempo. Observando todo el curso desde sus cabeceras hasta la desembocadura podremos ver otros cambios que tienen lugar. Si seguimos aguas abajo, encontramos que el gasto aumenta por la afluencia de agua de los tributarios. Con el aumento en la descarga se producen: (1) mayor tamaño del canal, (2) aumento de la velocidad y (3) aumento de la carga, pero con disminución en el tamaño de las partículas de roca que constituyen dicha carga.

Perfil longitudinal de una corriente. La planeación de presas, canales y otras obras hidráulicas a lo largo de una corriente requiere datos no sólo de la descarga y del cauce sino también una representación precisa del perfil longitudinal de la corriente. El perfil longitudinal es una línea que une con exactitud puntos localizados sobre la superficie de la corriente, lo cual se obtiene por levantamientos topográficos.

Nivel de base. La altitud de la desembocadura de una corriente está determinada por su nivel de base. Este viene a ser el nivel límite, más abajo del cual una corriente ya no puede erosionar (fig. 30). El nivel de base final para las corrientes en general lo es el nivel del mar, proyectado tierra adentro como una superficie imaginaria debajo de la corriente. Cuando una corriente corta

hasta esta superficie, su energía rápidamente llega a cero. Sin embargo, algunas corrientes desembocan en lagos. En estos casos, el nivel de base es precisamente el nivel del lago (fig. 30), pues la corriente no puede erosionar por debajo de él. Sin embargo, si el lago fuese destruído por erosión en su salida, ese nivel de base desaparecería y la corriente, habiendo adquirido energía adicional, profundizaría su cauce. Los niveles de lagos y todos aquellos que se encuentran por encima del nivel del mar son niveles de base locales. Un tipo común de nivel de base local es el de una faja de rocas particularmente duras que son atravesadas por el curso de la corriente. Aun el mismo nivel del mar cambia lentamente a lo largo de períodos enormes, lo cual afecta también los perfiles longitudinales de las corrientes.

Actividades geológicas de las corrientes: son las siguientes:

Erosión
- acción hidráulica
- abrasión
- solución

Puesto que todas éstas se desarrollan en el cauce, están íntimamente relacionado entre sí y todas evolucionan constantemente.

Erosión. La erosión de una corriente implica acción hidráulica, abrasión, solución y transporte. La acción hidráulica consiste en levantar y mover partículas sueltas por la fuerza inherente al flujo de agua. Esto puede ilustrarse por el impacto del agua de una manguera de jardín con la que se riega el suelo suelto; el cual se revuelve y es arrastrado por el agua.

La abrasión es el razonamiento mecánico de unas rocas contra otras.

En las corrientes esto es causado por la fricción y por el impacto entre las partículas de roca que se mueven con la corriente a diferentes velocidades y entre las partículas en movimiento y la roca firme del cauce. Lo anterior implica roce, raspadura, choque y trituración. La abrasión depende de la presencia de partículas de roca en la corriente, en tanto que la acción hidráulica puede ocurrir aun cuando no exista carga de sedimentos. En la mayoría de las corrientes el material del cauce y la carga en suspensión disminuyen de diámetro, de las cabeceras hacia la desembocadura. Tal cosa se debe en parte a la abrasión y en parte a la clasificación gradual y al depósito de las partículas más gruesas a medida que el gradiente, el cauce y otros factores se modifican gradualmente a lo largo de la corriente.

La solución tiene lugar cuando el agua de la corriente disuelve materia de los minerales que constituyen el lecho del río y de las partículas de roca que transporta. Sin embargo, sólo una pequeña porción del a materia en solución en el agua de la corriente se disuelve por la corriente en sí. La mayor parte se disuelve por las aguas subterráneas que circulan por debajo de los tributarios de la corriente principal, que más tarde llegan a ésta como aguas percolantes.

Transporte. La carga transportada por una corriente puede subdividirse como sigue:

- Carga
  - Acarreada en solución
    - Material disuelto
  - Acarreada mecánicamente como sedimento
    - Material en suspensión (sedimentos acarreados en suspensión)
    - Materiales del fondo (sedimentos acarreados a lo largo del fondo).

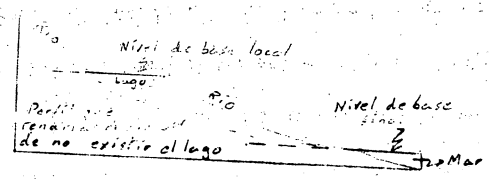


Fig 30. Relación idealizada entre el nivel de base final (el mar) y niveles de base locales como lagos, presas etc.

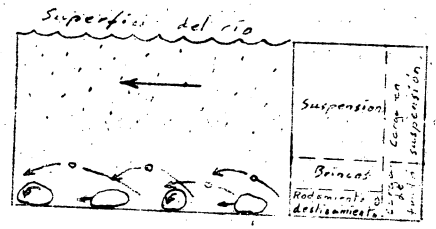


Fig 31. Tipos de movimientos de las partículas de roca que lleva una corriente y distribución vertical de la carga.

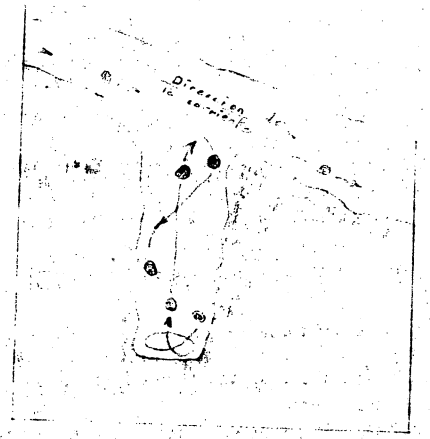


Fig 32. Excavación de una marmita por un remolino descendente

Tanto la forma como el peso específico de una partícula influyen también en la altura a la cual ésta se eleva. El peso específico es un factor importante en el transporte y depósito de partículas de sustancias metálicas muy pesadas, tales como el oro; la forma es importante en los minerales hojosos como las micas, pero en la mayoría de las partículas que transportan las corrientes, el diámetro es el factor principal porque el peso específico de la mayoría de las partículas arrastradas fluctúa entre 2.6 y 2.7 y es por tanto, casi constante.

La carga en suspensión consta generalmente de arcilla o limo, o de ambos. Su cantidad es mensurable y acerca de este punto se dispone de información adecuada.

El tiempo que una partícula permanece en suspensión depende de dos fuerzas opuestas entre sí: (1) la velocidad de caída que la partícula tendría en agua tranquila, (determinada por la atracción de la gravedad), a la que se opone la resistencia del fluído y (2) la intensidad de la turbulencia. Mientras el poder de elevación de la turbulencia sea mayor que la tendencia de la partícula a caer, dicha partícula permanecerá en movimiento por encima del fondo de la corriente.

La carga sobre el lecho de la corriente consta generalmente de arena o grava o de ambos materiales. Su cantidad es difícil de medir porque cualquier instrumento de muestreo que se haga descender hasta el fondo de la corriente producirá remolinos e inmediatamente cambiará la distribución de la energía y de las partículas de roca en las inmediaciones. Por este motivo se tiene poca información acerca de la cantidad de carga sobre el lecho en relación con la carga en suspensión, pero la poca que tenemos sugiere que en algunas corrientes la carga

sobre el fondo es igual o menor que la carga en suspensión.

Los movimientos indicados en la figura 31 están simplificados respecto a su condición real. Los guijarros y las partículas rocosas más grandes se deslizan o ruedan a lo largo del fondo; los granos de arena se elevan por encima del fondo debido a la acción de los remolinos y brincan a nuevas posiciones en donde reposan. Cuanto más pequeña es la partícula, mayor es la elevación y más largo el salto, pero los granos de arena rara vez saltan más de uno o dos centímetros. Los brincos de las partículas de roca en una corriente de agua o de aire se designan con el nombre de saltos. El deslizamiento, el rodado y los saltos son transicionales dentro del movimiento de las partículas en suspensión; de hecho, los diversos tipos de movimientos se entremezclan.

Además, las partículas de determinado tamaño se mueven de diversas maneras en tiempos diferentes, a medida que la energía de la corriente usaría al cambiar las condiciones de descarga. Por ejemplo, durante las inundaciones, los granos de arena fina pueden constituir parte de la carga en suspensión, mientras que en tiempo de estiaje sólo se mueven a lo largo del lecho de la corriente.

Depósito. Sobre el lecho de la corriente continuamente se están depositando partículas de carga. En una corriente larga cada partícula en transporte llega a descansar muchas veces, de manera que considerando todo su recorrido corriente abajo probablemente está más tiempo en descanso que en movimiento. Por lo tanto, cada partícula se mueve en una serie de brincos cortos o largos, de acuerdo con su tamaño, y sólo una pequeña parte de la carga potencial está en movimiento en cualquier momento.

Actividad geológica durante las avenidas. Muchas corrientes fluctúan a causa de la variación estacional de la lluvia sobre todo el sistema fluvial. Cuando su descarga aumenta durante las crecientes, la corriente es capaz de

transportar una carga mayor.

Un aumento de la velocidad produce un incremento no sólo de la carga total sino también del diámetro máximo de las partículas de roca que la corriente puede mover. En la carga del fondo el aumento en el diámetro es consecuencia principalmente del incremento de la fuerza aplicada directamente a las partículas de roca situadas sobre el lecho. El de la carga en suspensión es consecuencia del aumento de la turbulencia, en la cual parte de la fuerza actúa directamente hacia arriba. Los estudios experimentales revelan que al doblar la velocidad aumenta notablemente el diámetro máximo de las partículas de roca que pueden ser movidas. Un ejemplo claro pudo observarse al fallar súbitamente la Presa de San Francisco, cerca de Los Angeles, en marzo de 1928. Al romperse la presa, el agua se precipitó hacia el valle moviendo bloques de concreto de 10 000 toneladas por distancias de más de 750 metros.

Parte del incremento de la carga que generalmente acompaña al aumento en la descarga y en la velocidad de una corriente es aportado por los tributarios. Otra parte la toma la corriente de su propio cauce según lo indican los datos de las estaciones de medición.

Desde luego, el trabajo geológico que desarrolla una corriente durante las inundaciones estacionales es mayor que el que tiene lugar durante la época de estiaje.

8/1 Características geológicas de los cauces rocosos abruptos.

Arranque hidráulico y abrasión del lecho rocoso. Algunas corrientes, particularmente en sus cabeceras en áreas montañosas, tienen pendientes abruptas cuyo canal consta de roca maciza. La turbulencia que se produce en la pendiente inclinada aguas abajo desarrolla fuerzas de fricción capaces de mover partículas

de roca de gran diámetro. Se dice entonces que la corriente erosiona su fondo por arranque hidráulico, que es la acción de las aguas turbulentas mediante la cual desprenden y elevan bloques de roca firme del fondo, cuando ésta presenta juntas y otras superficies de debilidad. La elevación viene acompañada de succión en fuertes remolinos espirales alrededor de un eje vertical. En algunos lugares grandes peñascos han sido elevados verticalmente a alturas hasta de 30 metros.

En los cauces rocosos las corrientes excesivamente turbulentas también hacen cavidades o agujeros que en algunos lugares se conocen con el nombre particular de marmitas de gigantes. Estas cavidades son agujeros cilíndricos perforados en el fondo por abrasión, en lugares en donde una corriente arremolina guijarros y granos de arena que, formando un espiral, hacen las veces de taladro (fig. 32). De esta manera se han formado cavidades de más de 8 metros de profundidad. En tales corrientes la abrasión entre partículas de la carga y el fondo rocoso, por lo general, actúa puliendo la superficie de la roca que el arranque hidráulico deja con irregularidades.

Erosión en las cascadas. Bajo las condiciones especiales en las que una corriente se precipita de un borde o de un acantilado, como en las Cataratas del Niágara, la velocidad acrecentada del agua que cae, desarrolla una intensa turbulencia en la base de la catarata, en donde tanto el arranque hidráulico como la abrasión profundizan el fondo de la corriente de manera excepcional. La base del acantilado se mina y se debilita gradualmente con lo cual la cascada retrocede aguas arriba. El retroceso de la Catarata Canadiense en las cataratas del Niágara ha sido rápido. De acuerdo con los levantamientos topográficos efectuados entre 1850 y 1950 la velocidad de retroceso da un promedio de 1.20 metros

por año. Este rápido retroceso está favorecido por el hecho de que el borde de la catarata está formado por una roca dolomítica dura y resistente debajo de la cual se encuentra una lutita débil y fácilmente erosionable. A medida que la - [illegible] del arcil es erosionada hacia atrás, se forman cavidades y el borde de roca dolomítica queda sin sustentación.

Características geológicas del fondo de valles amplios.

Los meandros son las curvas o recovecos en el cauce de una corriente y se encuentran tanto en las corrientes pequeñas como en los grandes ríos.

Se ha visto que el tamaño de los meandros es proporcional a la anchura - del cauce y que se pueden formar en una corriente independientemente de que - ésta lleve o no carga. La formación de meandros parece representar una condición de estabilidad o de equilibrio aproximado, pero el mecanismo que rige la - distribución de los mencionados meandros en una corriente todavía no se conoce con precisión.

Como dijimos, no se requiere carga para que puedan desarrollarse los -- meandros. Sin embargo, muchas corrientes meandriformes, entre ellas el río - - Mississippi, llevan una carga abundante y depositan sedimentos de acuerdo con - un patrón definido. Este consiste en la formación de barras en forma de media luna construidas a la orilla de la curva interior convexa del cauce. Esos lugares son los que se conocen con el nombre de bancos o barras.

El crecimiento de una barra fluvial se puede ver en los experimentos realizados en modelos como el que se presenta en la figura 33. Las secciones transversales en esta figura indican que la línea de mayor velocidad (V) y la situación de los puntos de mayor turbulencia (T) son más grandes a lo largo del banco cóncavo. La arena erosionada en este banco se deposita y forma una barra a lo

largo de la siguiente margen convexa aguas abajo, en donde la velocidad y la turbulencia son menores. Aunque el crecimiento de las barras no es necesario para desarrollar los meandros, posiblemente acelera el crecimiento de un patrón de meandros estable.

Migración de los meandros: corte y abandono. A causa de la pendiente en la dirección valle abajo, la socavación es un poco más rápida en las riberas cóncavas que miran valle arriba que sobre las riberas opuestas. Por tal razón, los meandros tienden a migrar lentamente valle abajo quitando y añadiendo diversas porciones de terreno a las márgenes, de acuerdo con su ubicación, provocando con ello reclamaciones y disputas de tipo legal sobre las líneas de propiedad y discusiones acerca de los límites entre estados o provincias y aun entre países.

El funcionamiento de los modelos de ríos revela que si el material de las márgenes es uniforme, los meandros son simétricos y migran valle abajo a la misma velocidad. Puesto que el material de las riberas en una corriente natural no es uniforme, la migración de la margen del meandro que queda corriente abajo - puede verse obstaculizada por un banco de material resistente mientras que la -- margen del lado de aguas arriba, produce, migrando más rápidamente, una intersección en el "cuello" del meandro. Esto da lugar a una estrangulación que se - define como la intersección de la curva de un meandro por la curva próxima - - aguas arriba, motivando que la corriente pase de largo la vuelta que se encuentra entre las curvas. En el primer plano de la figura 24B, se ve que está a punto de ocurrir una estrangulación.

El resultado más frecuente del estrangulamiento es la formación de un lago en media luna, o sea un remanente fluvial que forma un lago curvo que ocupa un meandro abandonado. (Fig. 34, c)

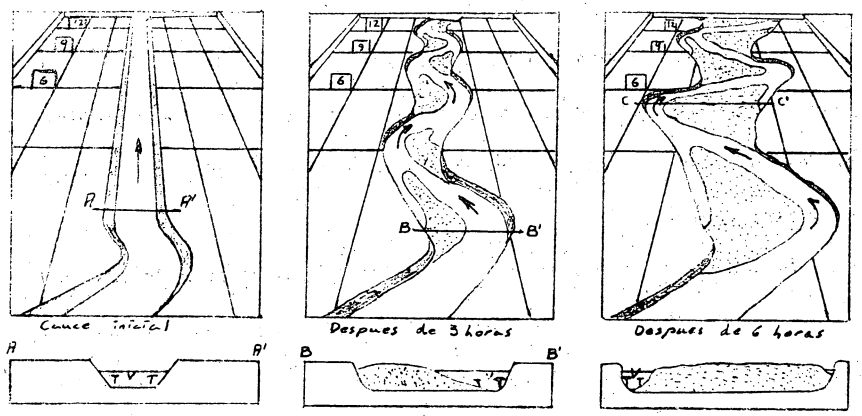


Fig. 33. Desarrollo de bancos en un modelo de río. El modelo se construyo desde el principio con una irregularidad. Despues de 3 horas se empezaron a desarrollar meandros

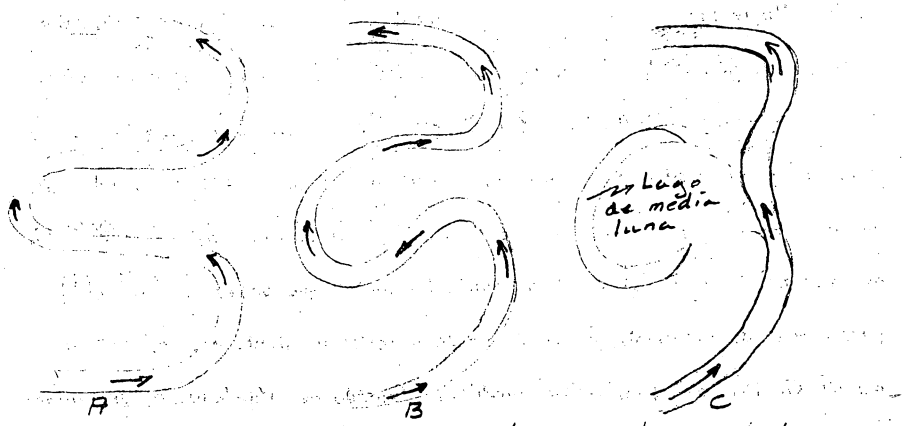


Fig. 34 Formación de meandros estrangulados en B y de un lago de media luna en C; debido a la presencia de rocas mas resistentes en la zona sombreada que impiden la migración de meandros aguas abajo

Otro tipo de corte es el que forma un canal de intercepción, que consiste en el abandono de parte de un meandro mediante el corte de un nuevo canal a - través de una barra. Esto ocurre durante las inundaciones, cuando el agua de la creciente se sale del cauce. En este caso, en lugar de seguir la pendiente suave alrededor del meandro el agua fluye siguiendo la mayor pendiente directamente a través de la barra y construye un nuevo cauce. Si la creciente persiste, el nuevo cauce sustituye al meandro, que entonces empieza a llenarse con sedimento fino.

La parte de cualquier valle fluvial que se inunda durante las crecientes es una planicie de inundación.

Corrientes trenzadas.

Una corriente trenzada es la que fluye a través de dos o más cauces interconectados rodeando islas de aluvión. Esta es una forma característica. La mayor parte de estas corrientes transportan material grueso tal como arena o grava. Un proceso que conduce a la formación de una corriente trenzada consiste en el depósito, cerca del centro de su cauce, de una barra inicial de aluvión grueso el cual no puede ser transportado bajo las condiciones que prevalecen comúnmente; pronto la barra se convierte en una isla con un cauce a cada lado, y de manera similar se desarrollan otras nuevas islas, llegando a formarse finalmente una red de canales múltiples semejantes a una trenza.

Otro tipo de trenzado es característico de las corrientes en las regiones secas que continuamente pierden agua por evaporación y por infiltración en su cauce. En estas corrientes la carga del lecho es muy abundante. La corriente deposita su carga de fondo rellenando el cauce, el cual pronto llega a ser tan somero que la corriente no puede quedar contenida en él y se desvía sobre uno de

los lados. El agua excedente, que tiene poca carga o ninguna, es capaz de labrar un nuevo cauce el que a su vez también pronto se llena con materiales de la carga del fondo. La corriente se desvía de nuevo y el proceso se repite una y otra vez, pudiendo existir varios cauces que actúan simultáneamente. El resultado final es un cauce trenzado y un cuerpo de aluvión formado por distintas series de cauces rellenos que se cruzan entre sí de manera compleja.

Abanicos o conos aluviales. Cuando una corriente fluye a través de un valle estrecho que desciende de las tierras altas y llega repentinamente a un valle amplio casi horizontal o a una planicie, el cambio brusco de la pendiente reduce la energía de la corriente y con ello su capacidad para transportar la carga. El depósito de aluvión resultante se concentra al pie de la pendiente inclinada formando un abanico que se define como un cuerpo de aluvión en forma de abanico depositado en la base de una pendiente abrupta (fig. 35). La superficie del abanico se inclina hacia afuera describiendo un arco amplio cuyo centro se encuentra en la desembocadura del valle estrecho e inclinado.

En la mayor parte de los abanicos existen cauces trenzados cuya formación está acompañada por el proceso de relleno de canales descrito anteriormente cuando de esta manera se forma una sección de un abanico, la corriente se desvía hacia un sector adyacente y se repite el proceso. Así un área relativamente amplia llega a quedar cubierta de aluvión, constituyendo un depósito de forma notablemente simétrica.

A menos que existan circunstancias especiales que lo preserven, el abanico será destruido a pedazos por la erosión continua debajo del perfil. Por lo tanto, un abanico no es sino un depósito temporal que representa la rápida proeza de una

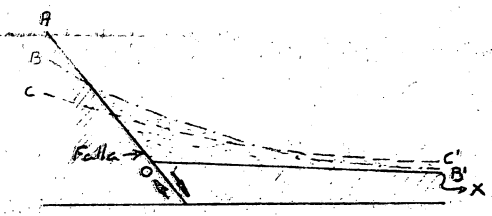


Fig. 35 Sección vertical mostrando el crecimiento de un abanico aluvial. La roca del fondo aparece achurada y el aluvión punteado. AOX es el perfil del terreno antes de iniciarse la formación del abanico. La línea BB' representa el perfil del río en una etapa inicial del abanico. CC' representa el mismo perfil en una etapa posterior en que el río ya a comenzado a erosionar al mismo abanico.

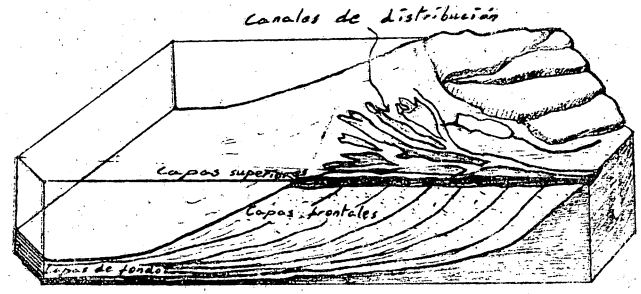


Fig. 36. Pequeño delta idealizado. Las capas frontales consisten en arena que gradúa hacia el mar a limo y arcilla en las capas de fondo

corriente que trata de alcanzar el equilibrio en donde éste es imposible de lograr sobre la pendiente original.

Deltas, Un delta es un cuerpo de sedimento depositado por una corriente que fluye dentro de un cuerpo de agua estancada. El flujo de la corriente es contrarrestado por la fricción a medida que el agua de dicha corriente se difunde dentro de la masa de agua estancada del mar o lago. La corriente pierde energía y deposita su carga como un delta. Existen varias clases de deltas. La que es más fácil de reconocer y probablemente la más común se presenta en la figura 36. Esta difiere de un abanico por las dos razones siguiente: (1) la pérdida de la energía de la corriente es más bien gradual que repentina; por lo tanto, los sedimentos se depositan más lentamente y con una disposición más ordenada; (2) el nivel del mar o del largo establece un límite aproximado al crecimiento vertical del depósito, cuya cima es más plana que el perfil de un abanico.

Las partículas de la carga del fondo se depositan primero según un orden decreciente de peso; después se asientan los sedimentos en suspensión. Una capa depositada de una sola vez (como la que se formaría durante una sola avenida), queda clasificada, graduando desde gruesa en la desembocadura hasta fina mar adentro. El depósito de muchas capas sucesivas llega a formar un gran banco que crece hacia afuera como el terraplén de una carretera que se construye volcando materiales. La parte gruesa y de pendiente abrupta de cada capa de un delta, recibe el nombre de capa frontal; si se le sigue mar adentro, se ve que el mismo estrato se adelgaza rápidamente y es de textura más fina, cubriendo el fondo sobre una superficie amplia. Esta parte delgada, de textura fina y de pendiente suave que corresponde a cada estrato del delta se llama capa del fondo.

A medida que se depositan capas sucesiva, las capas frontales de textura gruesa traslapan una a una sobre las capas de fondo produciendo la disposición que se aprecia en la figura 36. La corriente gradualmente se extiende mar adentro sobre el delta en crecimiento, erosiona la cima de las capas frontales durante las avenidas, y en otras épocas deposita parte de su carga de fondo a lo largo de su cañal. Estos últimos depósitos constituyen las capas superiores del delta. Por lo tanto, podemos definir estos depósitos como los sedimentos del cauce que yacen encima de las capas frontales de un delta. Durante las épocas de crecientes la corriente se sale de su cauce y forma canales de distribución accesorios a través de los cuales el agua penetra en el mar independientemente, multiplicándose así las capas frontales. Los canales de distribución accesorios radiales dan al delta una forma más o menos triangular que recuerda la letra griega Delta (Δ) de la que se deriva su nombre.

Puede parecer sorprendente que la carga en suspensión, gran parte de la cual ha sido transportada cientos de kilómetros a través del cauce de un gran río sin haberse depositado, se asiente repentinamente para formar parte de un delta determinado, en lugar de permanecer en suspensión lo suficiente como para ser arrastrada lejos de la tierra: pero las sales disueltas en el agua del mar coagulan o floculan las partículas finas en agregados lo suficientemente grandes para asentarse sobre el fondo con rapidez.

Algunos de los ríos más grandes del mundo, entre ellos el Nilo, el Hwang-Ho, el Mackenzie, el Colorado, el Mississippi, el Amazonas y el Orinoco han formado enormes deltas en sus desembocaduras. Cada delta posee sus propias peculiaridades y ninguno es tan simple como el pequeño delta que se presenta en la figura 36.

V-2.- FORMACION DE LOS VALLES.

Antiguamente se suponía que los valles tenían un origen tectónico y que el hecho de que en la mayor parte de ellos se alojara una corriente se debía a razones meramente topográficas, pero en la actualidad y gracias a observaciones geológicas, modelos de laboratorio y observaciones en algunos valles de rápida evolución, se sabe a ciencia cierta que la mayoría se han formado por erosión fluvial, si bien efectivamente existen valles estructurales originados por plegamientos o fallas.

Cómo comienza la formación de un valle. Aunque el área drenada por el escurrimiento laminar es grande, la superficie presenta muchas irregularidades. Por ello, ninguna lámina de agua fluye gran trecho pendiente abajo sin antes encontrar pendientes convergentes que las concentran en corrientes ya definidas. La concentración trae como resultado aumento en la profundidad del agua, mayor turbulencia e incremento de la erosión. Así, las láminas y arroyuelos que convergen llegan a formar una corriente con lo cual comienza el corte de un valle.

Los valles y el desgaste de masa. Aunque las corrientes cortan y profundizan sus valles y transportan la carga resultante de partículas de roca, la conformación de la mayor parte de la superficie del terreno, incluyendo las laderas de los valles mismos, no es el resultado del trabajo de las corrientes sino de la erosión laminar y el desgaste de masa de las rocas intemperizadas. Esto significa que el movimiento de la regolita pendiente abajo se debe a la erosión de la corriente la cual, al profundizar un valle, acentúa las diferencias locales de altura y pendiente. Por lo tanto, la velocidad del desgaste de masa está regulada

no solamente por la velocidad del intemperismo, sino también por la de la erosión de la corriente en cada punto de su perfil longitudinal. Por el contrario, la carga aportada a la corriente por el desgaste de masas consume la energía que de otra manera tendería a profundizar el cauce, con lo cual se retarda la velocidad del ahondamiento. Debido a estas relaciones, la velocidad del desgaste de masa sobre una vertiente debe aproximarse a una condición de estabilidad en equilibrio con la velocidad de erosión del cauce de la corriente al pie de la pendiente; cualquier cambio en uno afecta al otro. El cauce es esencialmente un nivel de base local para los procesos de desgaste de masa sobre la vertiente.

Evolución de un valle. La naturaleza de los cambios sistemáticos observados está ilustrada en la figura 38, A, B, C. En las primeras etapas del desarrollo de un valle su fondo es apenas más ancho que el cauce de la corriente, A. En esta etapa el área de drenaje es pequeña; por lo tanto, la carga procedente de aguas arriba es pequeña; [redacted], lo cual deja un excedente de energía disponible para erosionar el lecho, por lo cual, el valle se ahonda. Al mismo tiempo las irregularidades, desvían la corriente de lado a lado del cauce y provocan erosión tanto en las riberas como en el fondo.

A medida que el área de drenaje se amplía, crece la carga de sedimentos que los tributarios arrastran a la corriente principal. El movimiento de esta carga consume más energía de la corriente siendo menor la energía que profundiza el valle; pero las irregularidades continúan desviando la corriente, favoreciendo así el corte lateral.

La corriente desviada deposita partículas de carga en los lados interiores

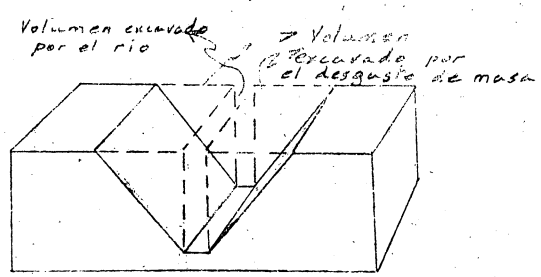


Fig. 37. Comparación entre el volumen de roca excavado por el rio propiamente dicho y el erosionado por desgaste de masa.

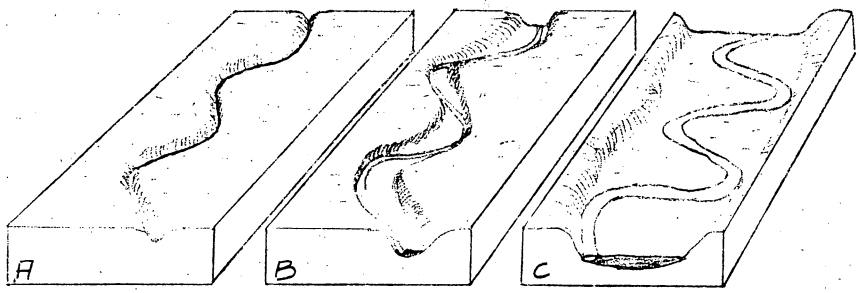


Fig 38 Evolución de un valle

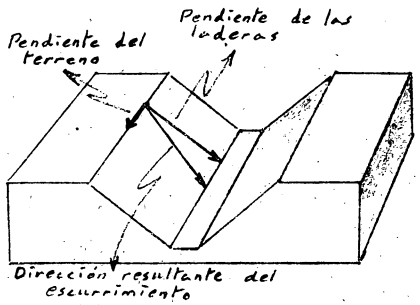


Fig. 39. Croquis explicativo de porque los tributarios desembocan en la corriente principal formando un angulo agudo.

de las curvas del río, en donde el agua tiene menos fuerza y el cauce se desplaza hacia afuera sobre las márgenes opuestas, en donde la turbulencia y la erosión son más efectivas. En consecuencia comienza a desarrollarse un valle de fondo plano cubierto con aluvión B.

Cuando la corriente ha ensanchado el fondo de su valle hasta alcanzar varias veces la anchura de su cauce, se forma una serie de meandros, C. El valle tiene ahora un fondo amplio cubierto con una delgada capa de material aluvial relativamente grueso, resultante del depósito de materiales que la corriente arrastra por su fondo. Si ésta rebasa su cauce, deposita aluvión muy fino sobre algunas partes del valle convirtiéndolo en una planicie de inundación.

Los fondos amplios de muchos valles están formados por aluvión excepcionalmente grueso, lo cual implica una evolución más complicada.

Crecimiento de los afluentes. El escurrimiento laminar de las vertientes de un valle concentra el agua del escurrimiento en corrientes laterales (tributarias) que fluyen hacia una corriente principal. Generalmente los tributarios o afluentes recién formados se unen a la corriente principal formando ángulos agudos por la razón que se ve en la figura 39. A medida que la erosión profundiza el valle de un tributario, la parte de su perfil longitudinal correspondiente a las cabeceras acentúa su inclinación. Como en la pendiente más abrupta la velocidad de erosión se incrementa, resulta que la cabeza del valle migra vertiente arriba. En otras palabras, el valle se alarga aguas arriba o sea en la dirección de sus cabeceras. El alargamiento rápido aguas arriba, de un grupo de valles, es característico de un drenaje de desarrollo reciente.

Sistemas de drenaje. Una corriente principal con su correspondiente conjunto de afluentes se llama un sistema de drenaje.

Las corrientes de un sistema de drenaje están espaciadas de acuerdo con la cantidad de escurrimiento, y los perfiles longitudinales de los afluentes se ajustan muy bien a las corrientes principales en las que desaguan. La corriente principal viene a ser esencialmente un nivel de base temporal para cada uno de los afluentes. Estos no pueden erosionar por debajo del nivel que tiene la corriente principal en la desembocadura de cada afluente, o sea el punto de confluencia; pero puesto que la corriente principal está haciendo descender lentamente su perfil longitudinal, el tributario o afluente puede hacer lo mismo a una velocidad comparable, con lo cual la totalidad del sistema de drenaje, regulado por la corriente principal, corta y erosiona de manera coordinada.

Ciclo de erosión. Aunque el carácter general de la erosión y su velocidad, se conocen por observación directa, la secuencia de las formas de modelado desarrolladas durante la larga y continua erosión de cada masa de tierra no se puede apreciar porque los cambios se efectuan de manera extremadamente lenta. Sin embargo, cuando comparamos un cierto número de superficies, cada una en un diferente estado de disección, notamos que las relaciones entre una y otra siguen cierto orden. Se les pude ordenar en series continuas cada una de las cuales difiere poco de la precedente. De ahí que parezca probable que una sola masa de tierra sujeta a la erosión podrá pasar, en el transcurso del tiempo, a través de todos esos estados. De ser así, podremos predecir de modo general la evolución del modelado que habrá de producirse. Este concepto queda confirmado por lo cambios observados en pequeña escala durante períodos cortos. Así,

el crecimiento de pequeños valles en terrenos agrícolas y en modelos de laboratorio.

La secuencia de formas, esencialmente valles y cerros a través de los cuales se cree que evoluciona una región desde que empieza a ser erosionada hasta que alcanza su nivel de base, es lo que se conoce como ciclo de erosión. El ciclo es un concepto teórico y sólo se le puede describir de modo general debido a que las variaciones en la precipitación, en el tipo de vertientes, y en la clase de rocas de un lugar a otro producen variaciones en las formas modeladas por la erosión.

La evolución visualizada en el concepto de ciclo está ilustrada de manera diagramática en la figura 40, basándose en la suposición de que las rocas son homogéneas, que el promedio de precipitación anual es de unos 750 mm. y que el escurrimiento medio es de 275 mm. por año. La secuencia de cambios puede resumirse como sigue: en la primera parte de la evolución (A, B, C) la superficie es generalmente inestable, el gradiente de las corrientes es abrupto y la erosión es rápida, al grado de que los valles se profundizan de manera activa y hacen cortes agudos en el terreno. A causa del vigoroso crecimiento de los valles, la superficie del terreno que se encuentra en esta condición se describe como joven o en estado de juventud.

En el paso siguiente de la evolución (fig. 40, D, E, F) la superficie es ya más estable. Los valles habrán disectado toda la superficie, pero los gradientes de las corrientes serán más suaves con lo cual la acción erosiva de las corrientes es más lenta. Las laderas, erosionadas, por el deslizamiento del suelo, tendrán formas suavemente curvas. La superficie que presenta esta condición se

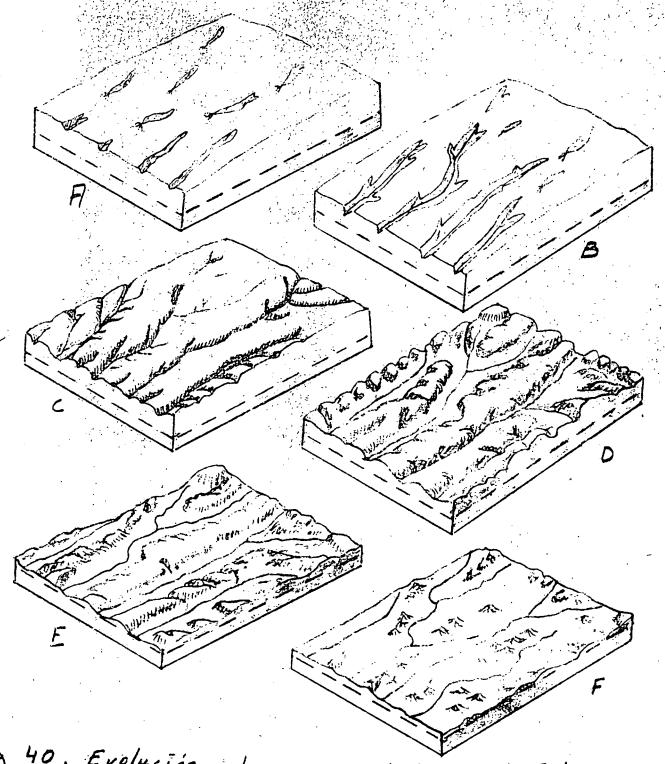


Fig 40. Evolución de un modelado fluvial
La línea interrumpida representa el nivel base.

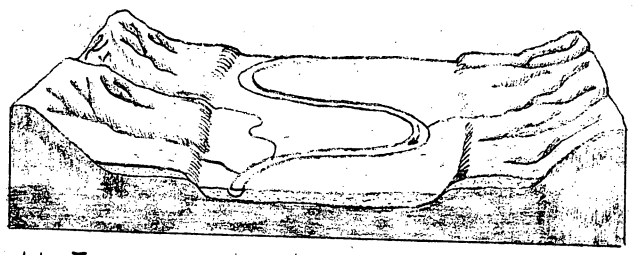


Fig 41. Terrazas aluviales resultantes del corte de un río en el fondo de su valle.

designa como madura. Sin embargo, como la transición de una etapa a la otra es gradual, no se puede establecer un límite preciso entre las superficies en estado de juventud y las maduras.

La superficie estable o madura tiende muy lentamente hacia el nivel de base, siendo la velocidad de erosión cada vez más lenta a medida que el gradiente de la corriente se hace más suave. La superficie que está en la última fase de erosión, cerca de su nivel de base se dice que es vieja o que está en estado de senectud.

El sistema total consiste en corriente, cauces, valles y vertientes que pasan por el desgaste de masa desarrolla y mantiene un conjunto estable. Sin embargo, la observación minuciosa de los valles nos indica que con mucha frecuencia el sistema estable se interrumpe. Puesto que una superficie de tierra una vez estabilizada no pierde ese estado a menos que sea alterada por una fuerza que la perturbe, llegamos a la conclusión de que debe haber ocurrido una interrupción que se manifiesta en forma de un cambio pronunciado en la energía del sistema. Las interrupciones caen dentro de dos grupos según causen: (1) una erosión notablemente mayor y (2) un gran aumento del depósito.

<u>Rejuvenecimiento: terrazas fluviales</u>. El rejuvenecimiento es el desarrollo de rasgos topográficos juveniles en una región que tiene características de estabilidad.

Las terrazas fluviales son otro ejemplo de interrupción causada por el aumento en la erosión. Una terraza fluvial es un banco o plataforma a lo largo de la margen de un valle, cuya superficie formaba parte del fondo aluvial del valle. En una corriente que escurre sobre un valle de fondo amplio, como el

de la figura 38 C, el aumento súbito en la velocidad de erosión da lugar al corte de un nuevo valle dentro del anterior. El fondo del valle precedente se conserva en parte como un par de terrazas fluviales (fig. 41) el cual, por supuesto será a su vez destruido completamente por la erosión.

V-3 Sedimentación fluvial en relación con las obras de ingeniería.-

Sedimentación de embalses. Cuando se construye una presa en un valle, se forma un embalse aguas arriba. El sedimento que llega al embalse se deposita en él y más pronto o más tarde el embalse quedará obstruido, es decir, se llenará de sedimento y perderá utilidad la presa. Es importante estudiar "la acumulación de "fango", de un embalse, ya que los buenos emplazamientos para construir presas son escasos y algunas veces es imposible reemplazar un sitio obstruido.

La figura 42 muestra esquemáticamente el proceso gradual de acumulación de fango de un embalse. Primero de todo, deberá notarse que la presencia de la presa frena la natural corriente; por tanto, el nivel del agua en el embalse no es horizontal, sino que su superficie es ligeramente curvada (curva del agua de cola). Cuando la corriente del río alcanza el embalse, la velocidad del flujo decrece y las partículas más bastas, como la arena, se depositan cerca del comienzo o entrada.

Así se forman las capas de cola con los sedimentos más bastos (letra b de la figura 42). Las capas del fondo son estratos de sedimentos finos que se van situando poco a poco por toda el área del embalse (letra c). La acción de las capas de cola tiene dos facetas: primero, impiden el paso de la corriente que llega de aguas arriba y contribuye a la formación de capas de antecola (letra a); segundo, a medida que pasa el tiempo, las capas de cola ganan terreno en el embalse

hasta formar estratos cada vez más altos que, a causa precisamente de su altura, no se forman con tanta pendiente como los de los estados iniciales de la sedimentación. Por consiguiente, los lechos altos de las capas de cola tienden a ponerse horizontales, avanzar corriente abajo y cubrir parte de las capas de fondo previamente sedimentadas. Esto produce una mezcla de sedimentos más bastos y más finos en el fondo del embalse.

Puede predecirse la localización de las futuras acumulaciones de fango en un embalse. Por ejemplo, el sedimento tenderá a acumularse cerca del muro de la presa si el nivel superficial del agua en el embalse está a una altura baja, especialmente durante las grandes avenidas de aguas; o si hay un porcentaje alto de arcilla en los tamaños finos del fango del sedimento; o si el embalse es corto y tiene el declive rápido del valle original; o si hay poca o ninguna vegetación en la cola del embalse; o si la presa tiene desagües pequeños a mucha altura. Si aparecen condiciones opuestas a las mencionadas o hay limitaciones topográficas entre la cola y la cabeza de la presa, el sedimento tenderá a acumularse en la parte superior del embalse.

En un embalse ancho, se observa una corriente turbia muy cargada con partículas finas y limitadas por ambos lados por agua clara. Esta corriente se sumerge en conjunto y marcha hacia la presa a baja altura. En un embalse las corrientes profundas, con mucha carga, se denominan corrientes de densidad [redacted].

El factor básico para calcular la vida de un embalse, es decir, el tiempo que continuará almacenando cantidad útil de agua, es el tiempo que el agua está en el depósito antes de utilizarse. Así pues, la vida útil de un embalse se deter

mina por la rapidez con la que se acumula el sedimento año tras año y no se quita del mismo ni por acción natural ni por el trabajo del hombre. Un tiempo corto de retención no permite a las partículas finas alcanzar el fondo. También, como el espacio de almacenaje se hace cada vez menor, hay un incremento del porcentaje de sedimento fino que abandona el depósito. En conjunto, aunque la velocidad de sedimentación disminuya, pasarán por la presa arenas finas o incluso material más basto.

El fango que se localiza a niveles suficientemente altos de embalse para poderse quitar, por ejemplo, por dragado, aunque semejante operación generalmente es difícil y costosa, se llama fango en almacenaje vivo. El fango en almacenaje muerto no puede retirarse. La vida de un embalse puede ampliarse por operaciones de suelta de agua (desagüe). Las puertas de salida se abren a intervalos apropiados y las corrientes de alta velocidad resultantes llevan una parte del sedimento aguas abajo. Si estas operaciones pueden regularse para interceptar corrientes subterráneas de gravedad (corrientes de densidad), la eliminación de sedimento puede ser muy eficaz. Se ha visto que el desagüe de sedimento ya depositado no es efectivo nada más que en el área del embalse inmediatamente aguas arriba de los orificios de desagüe.

Examen del fango en un embalse. El volumen de fango acumulado en un embalse durante cierto tiempo siguiente a su construcción puede calcularse comparando el mapa de líneas de perfil preparado antes de la construcción con el actual. El primer mapa se prepara por métodos usuales de investigación y el último se deduce de las medidas de sondeo o profundidad para un nivel de agua dado. El método de línea de perfil en el caso de embalses grandes se completa con el

método de alineaciones. Las alineaciones o direcciones se localizan primero sobre el mapa haciéndolas coincidir, si es posible, con afluentes y puntos claros de referencia en el plano del embalse, y luego se marcan con referencias permanentes en ambas márgenes del embalse. Las medidas se hacen desde un bote que sale de una orilla del embalse hacia una persona situada en la otra orilla. Esta persona mantiene la dirección apropiada usando banderines o teléfonos portátiles. Las distancias desde el punto inicial se pueden medir con una cinta métrica, tal como un alambre marcado enrollado en un tambor. En el caso de depósitos más anchos, se miden los ángulos horizontales usando dos instrumentos ópticos. Las profundidades se miden con una barra de sondeo o una especie de plomada. El volumen de sedimento en el depósito se determina por los datos de campo dibujando un mapa de perfiles y luego midiendo las áreas entre las líneas de perfil. Ocasionalmente, las áreas límites se calculan como en los trabajos de tierra corrientes.

Sedimentación en Canales.

Un tramo de una zanja abierta se comporta similarmente al de un río en cuanto a sedimentación se refiere. La acumulación de fango en canales se debe a la disminución en el gradiente longitudinal y a la disminución consiguiente en la capacidad de transporte del canal. Este efecto puede producirse, por ejemplo, por la vegetación que crece en aguas someras o en las superficies al aire (como ocurre bajo condiciones similares en embalses). Puede haber una tendencia a la erosión si la capacidad de transporte del canal aumenta al pasar de un tramo a otro; puede deberse a un aumento en pendiente longitudinal o al estrechamiento de la sección transversal.

Para combatir el fango en un canal de riego se realiza el desfangamiento completo o parcial del agua que llega al canal [redacted]

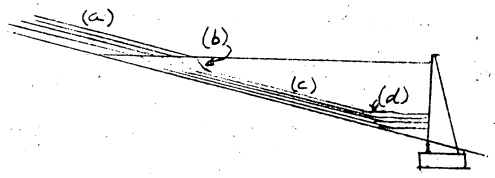


Fig. 42. Representación esquemática del proceso de sedimentación en un vaso.

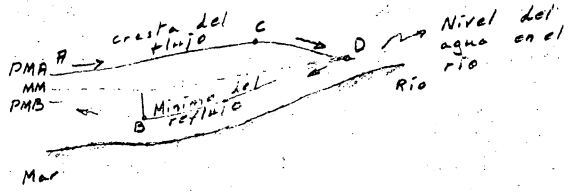


Fig 43. Acción de la marea en un río de marea (escala vertical exagerada).

[redacted] o la limpieza del canal obstruido con eliminación de las hierbas acuáticas u otras plantas.

La acumulación razonable de fango es beneficiosa en canales que pasan por terrenos altamente permeables. En tales casos es necesario proyectar una acumulación de fango determinada.

Sedimentación de puertos. Uno de los problemas más importantes de la construcción de puertos es mantener continuamente la mínima profundidad de agua necesaria para el movimiento, anclaje y calado convenientes de los barcos. En vista de que la profundidad del agua en un puerto disminuye por la acumulación del fango, deberán detenerse o desviarse las corrientes que llevan el fango al puerto y facilitarse el depósito de aquél en un lugar donde esta acumulación no sea perjudicial para la navegación. No obstante, si la acumulación de fango se forma dentro del área del puerto, no habrá más remedio que eliminarla. Generalmente, se realiza por dragado.

Antes de tomar medidas contra el azolve [redacted] del puerto deberá obtenerse la siguiente información: 1) direcciones a lo largo de las cuales el fango puede llegar al puerto, si desde tierra adentro por las corrientes marinas o a lo largo de la costa por corrientes litorales; 2) carácter predominante del sedimento, si es basto o fino o ambas cosas a la vez, y 3) cálculo aproximado de cantidades superpuestas de sedimento.

Sedimento basto. El sedimento basto, como el cascajo o cantos rodados, entra en un puerto desde un río de montaña turbulento que desemboca en un estuario con marea bastante tranquilo, como ocurre con el puerto de Washington, D.C., ubicado en el río Potomac. (La arena tiende a llenar muchos puertos). Como el

sedimento basto se mueve en las aguas inferiores, cerca del fondo del río, puede pararse o desviarse del puerto por una baja sucesión de muros. En este caso dichos muros no tienen que sobresalir del nivel de agua. (Ejemplos: St. Louis, Missouri, en el río Mississippi; Sacramento, California, en el río Sacramento.)

Sedimento fino. La acumulación de sedimento predominante o exclusivamente fino puede ocurrir en puertos ubicados en el punto de transición de un río que desemboca suavemente en un estuario con marea. Son numerosos los ejemplos (Nueva York, en el río Hudson; Savannah, Georgia, en el río Savannah; Londres, en el río Támesis). En este caso puede eliminarse el sedimento aprovechando las mareas.

La marea en los ríos. Los ríos que desembocan en el mar o en el océano pueden ser de marea o sin marea, según el intervalo de mareas. Las desembocaduras de los ríos con marea que fluyen en un mar son más grandes que las de los ríos sin marea, ya que un río con marea tiene que descargar no solamente el agua de su cuenca, sino también el agua del movimiento periódico de vaivén de la marea. No se forma delta en la desembocadura de los ríos con mareas, porque la velocidad del agua no cambia bruscamente, sino que el agua del río se mezcla gradualmente con el agua de la marea. Pueden producirse alguna precipitación y sedimentación de partículas por la acción electrolítica del agua del mar.

El lugar donde el río se encuentra con la marea se llama estuario. Puede estar en la desembocadura o en cualquier bahía o laguna. Corrientemente las aguas del estuario son más fangosas que las aguas del río, ya que el flujo y el reflujo de la marea conservan suspendido el sedimento continuamente en movimiento. Cerca de la desembocadura de un río con marea (punto A de la figura 43) el intervalo de mareas es el mismo que en el mar adyacente. Como la marea remonta la corriente, sus crestas también se mueven hasta alcanzar una elevación máxima en un punto C; entonces la cresta desciende, y en un punto D la marea desaparece. En casos excepcionales, si el cauce del río por encima del punto D es todavía suficientemente grande, puede propagarse una ola de marea pequeña a lo largo de dicho cauce (algunas veces hasta una distancia considerable, como en el río Amazonas, donde la ola de marea avanza aguas arriba unos 900 km). La cresta del reflujo posee un mínimo en el punto B, que está localizado aguas arriba cerca del borde del estuario. Por consiguiente la variación de altura de la marea en el estuario y a cierta distancia a uno y otro lado del mismo es más grande que en el mar.

Un prisma de marea considerable (es decir, un prisma de agua por encima de la marea baja) se mueve en todo puerto situado en un estuario con marea. Este prisma (Fig.43) puede aumentarse. Así se producen velocidades mayores que fluyen hacia fuera del canal del puerto. El tamaño del prisma de marea puede aumentarse mejorando las características hidráulicas del canal del estuario por encima o por debajo del puerto o creando una área de marea más grande aguas arriba del puerto. La bajamar puede usarse para eliminar el material del bajío, por proyectos apropiados de sucesión de muros y distribución de compuertas de marea unidireccionales.

V-4 Acción geológica del viento.-

En las regiones húmedas, excepto a lo largo de la orilla del mar, la erosión del viento se encuentra limitada por la cubierta predominante de hierbas y árboles, así como por la acción aglomerante de la humedad en el suelo. Pero la experiencia adquirida en la guerra en el desierto ha dado la necesaria importancia al hecho de que, en las regiones árida, los efectos del viento son desenfrenados. Tempestades de polvo obscurecen el cielo, transforman el aire en un horno sofocante y arrastran enormes cantidades de materias hasta largas distancias. Los buques que pasan por el mar Rojo reciben con frecuencia un bautismo de fina arena que traen los vientos del desierto; y más allá del extremo opuesto del Sáhara se han ido acumulando dunas en las islas Canarias con las arenas voladoras que, impelidas por el viento, atraviesan el mar intermedio. Algunas veces ha caído en Italia, y hasta en Alemania, polvo rojo acarreado hacia el Norte por las grandes tempestades procedentes del Sáhara. Las "lluvias de sangre" de Italia son debidas a este mismo polvo rojo bañado por la lluvia al caer desde la atmósfera brumosa.

Por sí mismo, el viento solamente puede arrancar sedimentos incoherentes y secos. Este proceso de rebajar la superficie del terreno se llama deflación (del latín deflare, llevar el viento). Armado con los granos de arena así adquiridos, el viento llega a ser cerca del suelo un poderoso agente de pulimento o abrasión. La erosión resultante se denomina abrasión del viento y corrasión (de corradere, estriar, rayar, arañar). A causa de los innumerables impactos, los mismos granos son pulimentados y redondeados. Este tercer aspecto de la erosión

del viento, de desgaste de las "herramientas", se llama atrición.

Como resultado de la erosión, transporte y sedimentación por el viento se producen tres tipos característicos de superficie desértica.

1) El desierto rocoso (la hammada del Sáhara), cuya superficie está formada por la roca viva que será pulverizada por deflación y pulimentada por abrasión;

2) El desierto pedregoso, con superficie de cascajo (el reg del Sáhara argelino), o de cantos rodados (el serir de Libia y Egipto); y

3) El desierto arenoso (el erg del Sáhara).

Complementario de estos tipos es el loess de las estepas marginales, depositado por los vientos cargados de polvo que proceden del desierto.

Dunas costeras y cerros de arena.-

A lo largo de las zonas bajas de costas arenosas y albuferas, donde los vientos predominantes vienen del mar, las arenas movedizas vuelan hacia tierra y se amontonan formando dunas, las cuales erigen un baluarte natural de cerros de arena. Cualquier montículo o loma de arena con una cresta o cumbre definida se llama duna. Su depósito comienza dondequiera que la fuerza del viento se encuentra obstaculizada por irregularidades de la superficie, entre ellas las hierbas y los árboles. En regiones húmedas son muy complejas las condiciones que rigen su formación y desplazamiento. El viento varía en fuerza y dirección. Vegetación y humedad tienden a fijar la arena, pero la fijación es con frecuencia incompleta. Durante los fuertes vendavales, las dunas viejas pueden ser deshechas y mermadas. La confusa reunión de montículos y hoyos resultante da a estas colinas costeras un relieve caótico característico.

Una duna ideal tiene un larga pendiente a barlovento que se eleva hasta una cresta, y una pendiente mucho más rápida a sotavento (fig. 44). Esta última está determinada por el hecho de que la arena lanzada por el viento sobre la cresta cae al abrigo de éste, y cae a su ángulo natural de reposo, como unos 30 a 35° para la arena seca.

En las situaciones en que las dunas no son efectivamente detenidas por la vegetación, o contenidas por vientos de cuadrantes opuestos, emigran lentamente en la dirección del viento predominante. Cuando el viento no está completamente cargado de arena recién adquirida, barre más la vertiente de barlovento y la deja caer sobre la cresta, de donde fluirá por la cara de deslizamiento hacia abajo. Mediante la substracción de arena de un lado y su adición en el otro, la duna va avanzando

A medida que una faja de dunas se interna tierra adentro a partir de la playa, otra se levanta en su lugar "de modo que, como si fuera una serie de enormes olas de arena, está en continuo movimiento desde la orilla del mar hacia el interior.

En muchas regiones amenazadas se han tomado medidas para detener el avance de las dunas. Son excelentes para este objeto las vigorosas hierbas aglutinantes. Las que están adornadas con penachos ásperos refrenan el viento, las zanjas dificultan la llegada de arena y continúan creciendo superficialmente a medida que la arena despistada se va acumulando y así van dejando atrás una intrincada red de largas raíces. Tales dunas protegidas llegan a nivelarse y el césped se propaga sobre ella. El posterior crecimiento de las dunas tiende entonces a producirse hacia el mar. Allí donde el problema tiene solución menos

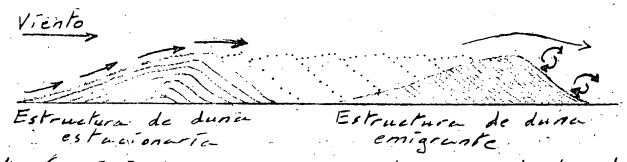


Fig 44. Crecimiento migración y estructura de las dunas de arena

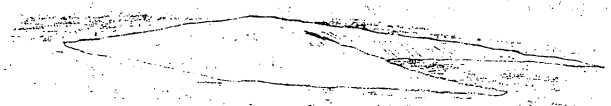


Fig 45. Barjan típico

Fig 46 Plano de una procesión de barjanes en el desierto libico.

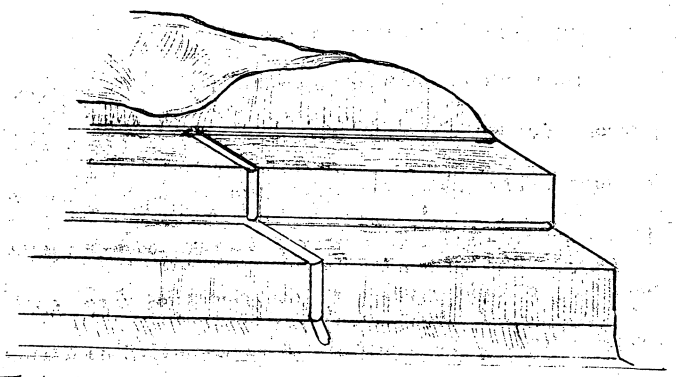


Fig. 47. Taludes escalonados en loess

fácil, se sujetan las dunas con más seguridad mediante el establecimiento de plantaciones de coníferas en el lado que mira hacia el continente y gradualmente se van extendiendo a través de la arena fijada parcialmente por medio de plantas herbáceas.

Dunas desérticas y arenales.

Alrededor de una quinta parte de la superficie terrestre es de desiertos, y por término medio una quinta parte de las zonas desérticas están cubiertas de arena. Una elevada proporción del suelo del desierto es una superficie de erosión de la roca viva, localmente cubierta de rocas detríticas de grano grueso. Las regiones de pizarras arcillosas y calizas proporcionan poca o ninguna arena, pero allí donde son desintegradas las areniscas o sufren la deflación los aluviones mixtos, el viento levanta los granos desprendidos y los concentra en vastos yermos de arena y largas cadenas de dunas.

Los factores que regulan la forma de las acumulaciones de arena están muy lejos de ser sencillos. Comprenden la naturaleza, extensión y porcentaje de erosión de la formación que los alimenta; tamaño de los granos de arena y fragmentos asociados; variaciones en la fuerza y la dirección del viento, y la rugosidad o pulimento de la superficie (por ejemplo, la presencia o ausencia de guijarros) a través de la cual la arena se mueve y deposita. De las formas de arena resultantes se pueden distinguir tres tipos principales:

a) Dunas semilunares o barjanes (nombre que les dan en Turquestán y que ha sido adoptado generalmente), que se presentan como unidades aisladas (fig. 45), ya sea esporádicamente, ya sea en enjambres a modo de larga cadena,

ya sea en colonias, más o menos articuladas lateralmente, que avanzan a través del desierto como gigantescas aunque irregulares ondulaciones (fig. 46).

b) Lomas lineales o dunas longitudinales (llamadas seifs en el Sáhara), que ordinariamente se presentan en alineaciones paralelas de inmensa longitud, cada una de ellas diferenciada por una cresta tras otra "en sucesión regular como los dientes de una enorme sierra".

c) Arenales de vasta extensión, que pueden ser llanos y ondulados.

Las dunas se levantan dondequiera que un viento cargado de arena acumula ésta en la falda de un obstáculo casual. El montículo crece en altitud hasta un plano de deslizamiento que determinan los aludes sobre el lado abrigado de sotavento. Cuando la duna emigra, los extremos - ofreciendo menos resistencia al viento que la región de la cumbre - avanzan más rápidamente, hasta que se extienden en flancos de tal longitud que su total poder obstructivo llega a ser igual al del centro de la duna. La forma semilunar resultante persiste entonces apenas con pequeñas modificaciones de configuración y tamaño, mientras el viento sigue soplando del mismo cuadrante. La anchura de un barján, ordinariamente, es unas 12 veces mayor que la altura, la cual puede llegar hasta unos 30 metros como máximo. Para el crecimiento y estabilidad de los barjanes, es esencial la existencia de vientos que soplen de manera continua y aproximadamente en la misma dirección. En tales condiciones y suponiendo que el suministro de arena sea suficiente, enjambres alargados de barjanes avanzan lentamente, como los vehículos desfilan por la calzada de una calle de dirección única (fig. 46). La velocidad de su avance varía desde 6 metros

al año para las dunas más altas, hasta 15 metros al año las más pequeñas.

En donde el viento predominante está interrumpido por fuertes vientos cruzados que arrojan arena lateralmente, las condiciones vienen a ser las de una calle de dirección única que llega a estar interceptada por la afluencia de tráfico en cada cruce. En lugar de una cadena de barjanes se forma una duna larga o seif, una loma elevada continua aunque aserrada, paralela a la dirección del viento dominante y que en algunos casos recorre en línea recta un centenar de kilómetros o más. En el Irán meridional, tales lomas alcanzan ocasionalmente 200 m de altitud. En Egipto, 90 m es lo corriente.

Loess.-

El loess es una acumulación de polvo y limo llevada por el viento, precipitada del aire por la lluvia y retenida por la acción protectora de las hierbas de la estepa. Cada primavera, la hierba crece un poco más por encima del material recogido durante el año precedente, dejando atrás un sistema de ramificación de raíces marchitas. En inmensas extensiones se han acumulado centenares de metros. El material en sí es amarillo o ligeramente de color de ante, muy finamente granulado y desprovisto de estratificación. Aunque es muy friable y poroso, las sucesivas generaciones de raíces herbáceas, representadas actualmente por tubos estrechos ocupados por carbonato cálcico, lo hacen bastante coherente para mantenerse de pie en murallas verticales que no se derrumban a menos que sean atacadas. El tráfico a lo largo de los caminos pone en libertad las partículas de este material; el viento levanta nubes de polvo, y los caminos se deterioran en tal forma que se convierten en desfiladeros de paredes empinadas y cañones en miniatura.

Algunas propiedades de los loess.

Su espesor es variable aunque por lo común no exceden de los 100 m. Es un material muy poroso sobre todo en la dirección vertical, debido muy probablemente a la existencia de largos tubos verticales formados por raíces de plantas. La plasticidad del material es escasa o moderada.

Si se humedece un suelo de loes sometido a carga, se consolida rápidamente y la construcción edificada sobre él experimenta asiento. Esta propiedad de los loes se denomina a veces hidroconsolidación. Existen para ella dos explicaciones. La mayor parte de los loes en los Estados Unidos tiene películas o envolturas de arcilla alrededor de los granos de limo. El agua de adición lubrica las arcillas y es causa de que los granos de limo resbalen los unos con respecto de los otros, lo que trae como consecuencia que haga asiento la construcción edificada en el loes.

Problemas de ingeniería en las zonas de loes. Como consecuencia de sus características de hidroconsolidación, el loes puede constituir un material peligroso, desde el punto de vista de su capacidad como suelo para cimentaciones, si llega a ponerse en contacto con el agua. En el caso de presas, y más específicamente de sus vasos el humedecimiento de los materiales subyacentes por las aguas de las mismas puede traer consigo un asiento considerable del cierre. También se conocen ejemplos de fallos de construcciones de menor categoría en loes que llegaron a saturarse de agua. En un caso espectacular de asiento, el agrietamiento de una casa se produjo de la noche a la mañana a causa del escape de agua de una manguera que quedó abierta por descuido en una pradera.

Otra de las dificultades que originan los loes resulta de su propensión a que se abran en ellos vías permanentes bajo la acción de las aguas. Si una excavación o canal comienza a presentar fugas de agua, forman éstas caminos dentro de la masa del loes, y avanzan y se ensanchan progresivamente, a menudo de forma irregular, hasta que el terreno falla. Pueden darse casos de accidentes semejantes cuando se colocan tubos de acero en el loes. El agua de escapes o infiltraciones se abre paso alrededor del tubo o conducción, y se sabe de casos de cavidades de hasta 1 metro de diámetro. Claro es que accidentes de este tipo parece que puedan precaverse mediante colocación cuidadosa de la tubería y del relleno a su alrededor.

Con objeto de vigilar el asiento de las presas de tierra construidas en loes, se han ideado métodos especiales de componer y colocar las lechadas, los cuales consisten en bombear una papilla de loes y bentonita, o solamente de loes, en perforaciones practicadas en la cimentación.

Por lo general, no es difícil la práctica de excavaciones en loes, como consecuencia de la capacidad que ofrece ese material para mantenerse en taludes casi verticales. Pero tales taludes empinados están sujetos, sin embargo, a la formación de conos y cavidades de erosión, con acumulación al pie del talud del material arrancado. Conforme una barrancadita así iniciada va avanzando hacia la parte alta del talud, puede originarse un deslizamiento.

Problemas que presentan en ingeniería las areas de dunas y arenas.

La estabilización de arenas "vivas" en un problema de orden mayor en la construcción y mantenimiento de carreteras y ferrocarriles que crucen zonas de duna en áreas desérticas. Puede alcanzarse, por ejemplo, sembrando las dunas con

variedades de aquellos tipos herbáceos que pueden prosperar en arena, a pesar de que queden a veces cubiertas parcialmente por los materiales transportados por el viento. Más recientemente se han empleado métodos de más sustancia y permanencia, tales como plantación de árboles jóvenes (en su mayor parte coníferas, tales como el pino) o tratamiento de la arena con aceite mineral pesado.

Las partes bajas de las torres de transmisión de comunicaciones y energía eléctricas erigidas en localidades de dunas arenáceas pueden quedar descubiertas y cubiertas en épocas alternas, con la correspondiente variación de las distribuciones de esfuerzos en la torre. [redacted] Incluso puede desplazarse de su sitio la duna en que se apoyó la torre, dejando descubierta la cimentación de ésta y, por consiguiente, en situación inestable. La plantación de herbáceas o aplicación de aceite mineral denso (chapopote de carreteras) son de empleo apropiado en estos casos. Sin embargo, en los casos de cimentaciones de estructuras muy costosas deberían recurrirse a la hincadura de pilotes hasta profundidades que no queden afectadas por las veleidades de las dunas.

Como consecuencia de la capacidad de absorción de agua de las dunas de arena, la construcción y conservación de presas en esa clase de terrenos es sumamente costosa, y pueden construirse embalses, en el caso de que sus vasos se extiendan en esa clase de terrenos, solamente si son admisibles grandes pérdidas de agua por escape. Los canales de riego en terrenos de dunas de arena deberían revestirse.

V-5 EROSION MARINA:-

Mareas y corrientes.

La marea es un movimiento periódico de elevación y descenso del mar que se efectúa, por término medio, cada 12 horas y 26 minutos. Las mareas se deben esencialmente al paso alrededor de la Tierra, a medida que ésta se mueve en su rotación, de dos grandes elevaciones de agua o abombamientos antípodas producidos por la atracción diferencial de la Luna y el Sol. Es fácil comprender que el agua que da frente a la Luna pueda sufrir una elevación, pero es menos evidente que lo mismo ocurra en el lugar opuesto de la Tierra. La base de la explicación está en que el agua centrada en A (fig. 48) es atraída más fuertemente por la Luna que la Tierra, centrada en T, mientras que, a su vez, la Tierra es atraída con mayor fuerza que el agua centrada en B. El agua del lado opuesto queda, así rezagada casi en la misma extensión en que el agua del lado próximo a la Luna es arrastrada hacia adelante. Desde lugares tales como C y D, el água se aparta y se produce la bajamar. A medida que la Tierra gira en torno a su eje, cada meridiano viene a ocupar a su vez de un modo sucesivo las posiciones de pleamar y bajamar, lo cual se efectúa aproximadamente dos veces al día; no es exactamente dos veces a causa de que se debe tener en cuenta el movimiento de traslación de la Luna en su órbita.

El efecto del Sol es similar al de la Luna, pero considerablemente menor. Cuando la Tierra, la Luna y el Sol están en línea recta (sizigias), se suman las fuerzas productoras de la marea que proceden del Sol y de la Luna, y resultan las llamadas mareas vivas. Cuando el Sol y la Luna forman ángulo recto con la Tierra (cuadraturas), la Luna produce mareas altas dondel el Sol origina mareas bajas. Entonces ocurre que, respectivamente, son menos altas y menos bajas que

de ordinario, y se llaman mareas muertas.

Cerca de la costa, la corriente de flujo de la marea es con frecuencia lo bastante poderosa para remover las piedras y de este modo limpiar el fondo y efectuar el transporte de sedimentos en la costa o a lo largo de ella. Las corrientes complementarias de flujo son menos activas como agentes de erosión y transporte porque se inician en aguas someras y avanzan hacia aguas más profundas. Los guijarros y la arena quedan atrás, y solamente son arrastrados los materiales más finos. En los estuarios, en que la corriente del río se añade a la de reflujo, el transporte se efectúa con preferencia hacia el mar. Pero como el agua dulce del río transporta una carga de cieno y barro, tiende a resbalar sobre el agua salada, más densa, la cual ocupa el fondo, y de este modo la carga queda en suspensión en la parte superior y se extiende mar adentro, mientras que los derrubios más gruesos son precipitados y tienden a acumularse formando barras de arena.

Oleaje.-

Dejando aparte los efectos de las mareas y las perturbaciones accidentales del mar asociadas con terremotos y erupciones volcánicas, las olas son debidas por completo a la acción del viento sobre la superficie del agua. Esta adquiere un movimiento ondulatorio que va avanzando y gradualmente aumenta en altura y aceleración. La altura de una ola es la distancia vertical entre depresión y cresta (Ca en la fig. 50). La distancia horizontal de cresta a cresta - o de depresión a depresión - se llama longitud de onda. La altura que llega a ser alcanzada por una ola impulsada por el viento, en parajes donde no se encuentra restringida por la escasa profundidad del agua, depende de la fuerza, la duración y la deriva del viento, entendiéndose por deriva la longitud de la extensión abierta de agua a través de la cual sopla el viento.

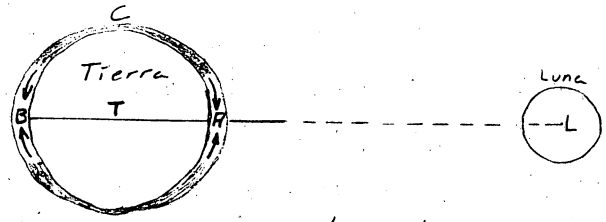


Fig 48. Croquis esquematizando el origen de las mareas

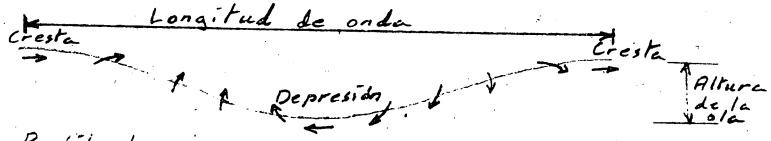


Fig 49. Perfil de una onda de oscilacion, mostrando el movimiento de las partículas de agua en diversos puntos.

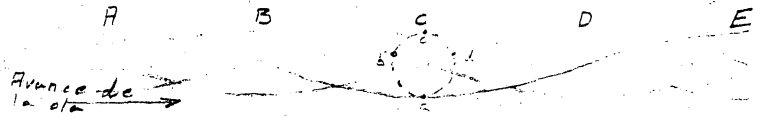


Fig. 50. Esquema de la orbita recorrida por una partícula de agua durante el paso de una onda de oscilación: A,B,C,D,E = posiciones sucesivas de la cresta a,b,c,d = posiciones correspondientes de la partícula; AE = Longitud de onda; ca = altura de la ola.

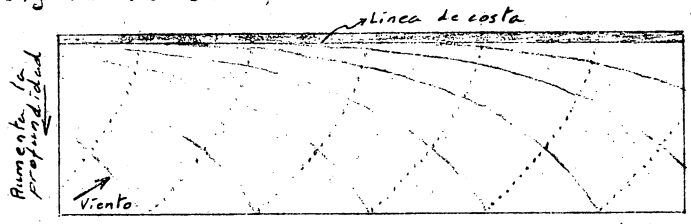


Fig. 51. Refracción de las ondas hasta volverse paralelas a la costa

Es importante comprobar que en el mar libre - aparte de la deriva del viento - solamente se desplaza la forma de la onda, no el agua propiamente dicha. - Cada partícula de agua se mueve describiendo una órbita circular durante el paso de cada onda completa, siendo el diámetro igual a la altura de la ola (véanse — figs. 49 y 50). Esto se demuestra observando el comportamiento de un corcho flotante por debajo del cual pase un tren de ondas. Cada vez que el corcho sube y baja, se mueve también de un lado a otro, sin avanzar sensiblemente con respecto a su posición media. Tales olas se llaman ondas de oscilación. Sin embargo, si el viento es muy fuerte, cada partícula de agua avanza un poco más de lo que - retrocede. Análogamente, en aguas poco profundas, donde el roce contra el fondo comienza a ser sensible, cada partícula retrocede un poco menos de lo que -- avanza. En ambos casos, la órbita, en vez de ser un círculo cerrado, semeja una elipse que no llega a cerrarse del todo, y por consiguiente el agua deriva lentamente en la dirección en que avanza la ola.

La energía aportada por el viento a una masa de agua es transmitida hacia su interior lo mismo que a lo largo de su superficie. Debido al rozamiento, el - diámetro de las órbitas disminuye rápidamente en profundidad hasta llegar a ser casi inapreciable cuando alcanza la equivalente a la longitud de onda. La mayor - profundidad a la cual los sedimentos del fondo del mar pueden ser agitados por el agua en movimiento se llama base de la ola. En mares poco profundos y en la - orla continental, donde la profundidad del agua es menor que dicha base, los cantos rodados, granos de arena y partículas de barro son volteados o balanceados por las corrientes hasta que caen a profundidades donde permanecen en reposo, por no llegar a ellas la agitación de las olas.

La agitación del fondo del mar implica el rozamiento contra éste, y, en consecuencia, cuanto más somera sea el agua, más se retardará el frente de olas con disminución de la longitud de onda. Por esta razón, a medida que una ola se acerca a la costa, su línea de crestar va girando hasta ser paralela a la playa, como indica la figura 51.

Las olas, pues, se incurvan o refractan, siendo al final paralelas a la línea litoral.

Cuando una ola alcanza, frente a la costa, profundidades medias del mismo orden que la altura de la onda, ésta comienza a romper. Siendo insuficiente la cantidad de agua enfrente de ella para completar la forma de la onda, mientras que continúa el movimiento orbital, la cresta se desploma al carecer de soporte. Entonces el agua de la superficie avanza compacta formando marejada. La onda de oscilación se ha convertido en una onda de traslación. El avance físico del agua que forma esta clase de onda es lo que hace posible la marejada que en el empuje final se lanza contra la playa, para retroceder el agua pendiente abajo.

Erosión Marina.-

El mar actúa como agente de erosión de los cuatro modos siguientes:

a) Por la propia acción hidráulica del agua, que arrastra los materiales desmenuzados por las corrientes y el olaje, y que asimismo destruye las rocas resquebrajadas por las olas, a modo de martillo gigantesco que golpeara los acantilados;

b) Por corrasión, cuando las olas, armadas con fragmentos de rocas, los arrojan contra los acantilados, y en colaboración con las corrientes los esparcen a todo lo ancho de la plataforma continental;

c) Por abrasión, siendo los fragmentos de rocas (o "herramientas" de antes) desgastados a su vez por los golpes y el rozamiento, y

d) Por corrosión, es decir, por acción disolvente y química, la cual, en el caso del agua del mar, es de importancia limitada, excepto en las costas donde abundan las calizas.

El choque destructor de las olas rompientes contra los obstáculos es mayor de lo que generalmente se puede sospechar.

Las fisuras y grietas se abren y ensanchan con gran rapidez. El agua se introduce con fuerza en cada una de las aberturas, comprimiendo firmemente el aire ocluído entre las rocas. Al retirarse cada ola, el aire comprimido se expande súbitamente con fuerza explosiva, y los bloques grandes lo mismo que los pequeños se van desprendiendo, y por último se desploman a causa de la presión recibida por detrás. La acción combinada de bombardeo y explosión tiene mayor efecto como proceso de arranque sobre aquellas rocas que ya estaban divididas en bloques por diaclasas y estratificaciones, o que estaban ya fracturadas por cualquier otro procedimiento, por ejemplo a lo largo de fallas o zonas de fricción.

Los acantilados se originaron por la acción socavadora de las olas contra las vertientes de las tierras costeras (Fig 52). Por derrumbamiento de las rocas colgadas sobre el socavón excavado en la base del acantilado, este último va retrocediendo gradualmente y presenta una cara abrupta que mira hacia el mar, el cual avanza hacia el interior.

A medida que los acantilados van retrocediendo, se forma enfrente la llamada plataforma de abrasión, cuya parte superior es visible por ser el fondo rocoso que queda en seco a la bajamar.

En las rocas macizas y resistentes, este proceso es extremadamente lento. - En consecuencia, como el acantilado retrocede y la plataforma se va ensanchando, las olas han de atravesar una ancha faja de aguas poco profundas, de modo que, - cuando llegan al pie del acantilado, la mayor parte de su energía se ha disipado ya. Así, la proporción en que participa la erosión costera queda automáticamente reducida.

Por el contrario, si el mar invade una costa de rocas mal consolidadas, la plataforma enfrente de ella será mucho más rápidamente desgastada, y la erosión - normal de la costa se llevará a cabo vigorosamente. En algunas localidades, las penetraciones del mar alcanzan alarmantes proporciones.

Transporte y sedimentación a lo largo del litoral.-

El arrastre de los sedimentos por el litoral se lleva a cabo de dos maneras: por deriva a lo largo de la playa, debida principalmente a olas oblicuas, y más - lejos mediante el transporte por las corrientes litorales. Cuando las olas se arrastran oblicuamente con respecto a la costa, a causa de fuertes vientos, los derrubios son arrastrados sobre la playa siguiendo una trayectoria curva. El retroceso de la ola puede tener un movimiento ligeramente hacia adelante al principio, debido a la oscilación del agua en su vuelta al mar, pero tiende a dragar el material hacia abajo en las pendientes más pronunciadas, hasta que es alcanzado por - la próxima ola, con lo cual se repite el proceso (fig. 53). Mediante la continua repetición de este proceso en zigzag, arena y guijarros son arrastrados a lo largo de la orilla.

La dirección del arrastre puede varias de tiempo en tiempo, pero a lo largo de muchas costas se efectúa un movimiento acumulativo en una sola dirección,

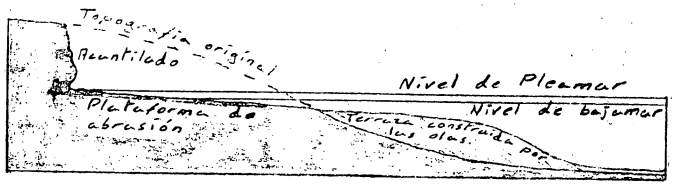


Fig. 52. Corte esquemático de una de las etapas del desarrollo de un acantilado marino, plataforma de abrasión y terraza de acumulación.

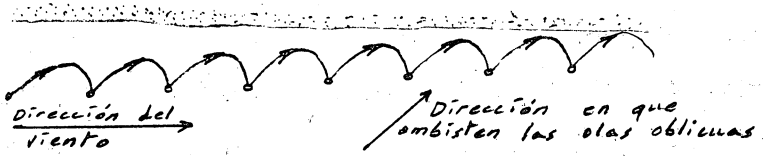


Fig 53. Diagrama de la deriva de una playa paralela a la dirección del viento. Se muestra el movimiento de un guijarro movido por las olas durante la marea alta.

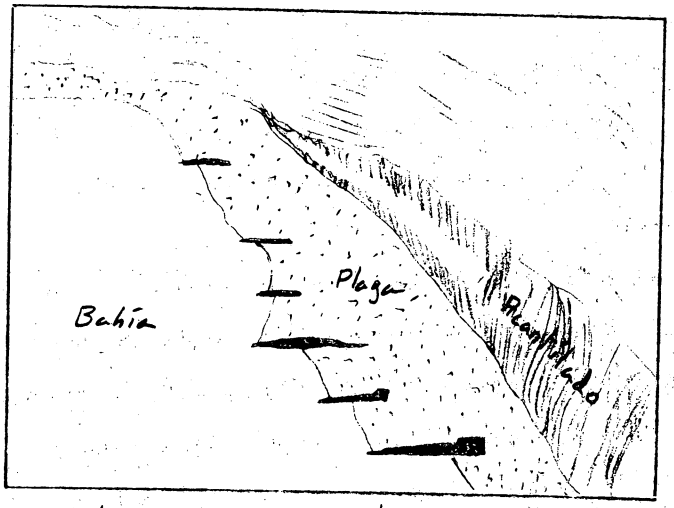


Fig. 54. Espolones para protección de playas

regulada por los vientos predominantes más activos.

Allí donde se considera conveniente proteger la costa para frenar la deriva de arena y graba, se construyen barreras transversalmente con respecto a la playa. En el lado de barlovento de uno de estos espolones, los derrubios se amontonan, mientras que en el lado de sotavento son arrancados, para ser retenidos a su vez por el espolón siguiente (fig 54).

Cuando la erosión del litoral está en auge a lo largo de una costa festonada, se construyen flechas y cordones litorales así como playas. Allí donde la costa presenta una curva, o la entrada de una bahía o un estuario, los materiales transportados por la deriva y las corrientes a lo largo del litoral son transportados más o menos en línea recta y se depositan en las aguas más profundas situadas a continuación. El alfaque así iniciado se eleva gradualmente hasta formar un banco de arena. Este va creciendo en altura por aportaciones a partir de su conexión con el continente hasta que se forma un arrecife que surge por encima del nivel del mar en continuidad con la orilla de la cual proceden los aportes de materiales que han contribuído a su construcción. Este camellón va creciendo sin cesar en longitud, mediante sucesivas adiciones de materiales en su extremo, hasta que las olas o las corrientes de cualquier otra procedencia limitan su crecimiento hacia fuera.

Si este cordón termina en aguas libres se llama flecha o espiga. Las olas de tempestad hacen rodar materiales sobre el lado protegido, especialmente cuando se abaten perpendicularmente, y de este modo algunas flechas tienden a desplazarse hacia tierra, y con frecuencia se curvan durante este proceso. Esta curvatura se produce también por la tendencia de las olas oblicuas a girar en redondo hacia el final (es decir, por la tendencia a refractarse) en los parajes donde

el fondo del mar un poco más allá desciende a una profundidad considerable. De este modo, la flecha o espiga adquiere entonces forma de gancho o cuerno (fig. 55).

Un cordón litoral es una flecha que se extiende entre dos cabos, o algo parecido. Si la bahía queda completamente cerrada por este cordón se convierte en un lago o albufera. Sin embargo, es más frecuente que exista un estrecho canal que mantiene abierta la corriente de la marea y el desagüe o reflujo (Fig 56).

Fig 55. Desarrollo de una flecha en forma de gancho (Altaque) pro retracción de las olas oblicuas.

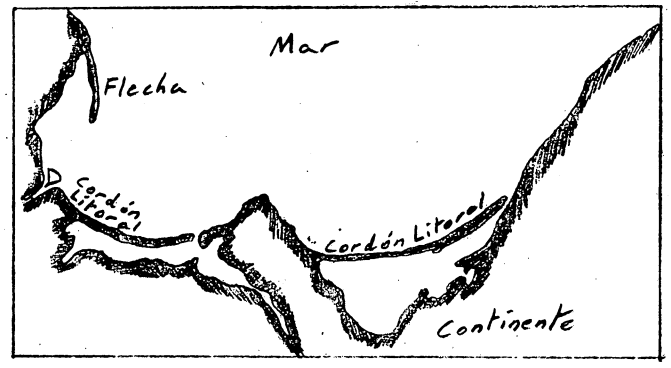


Fig. 56 Flechas y cordones litorales (barras).

VI - FOTOGRAFIA AEREA: (CLASIFICACION)

Las fotografías aéreas se pueden tomar con la cámara apuntando verticalmente de arriba abajo, o con la cámara dispuesta oblicuamente, mientras el avión sigue una trayectoria horizontal. Las primeras se llaman fotografías verticales y las últimas, fotografías oblicuas. Las oblicuas, si se toman bajo un angulo bastante grande con la vertical, incluirán también el horizonte distante, pero si apuntan más directamente hacia abajo, o sea bajo un ángulo pequeño con la vertical, no se verá en ellas el horizonte. Estas fotografías se llaman, respectivamente, oblicuas altas (u oblicuas con horizonte) y oblicuas bajas.

FOTOGRAFIA AEREA

La ciencia y arte de tomar fotografías de precisión de los rasgos de la superficie terrestre desde una máquina de volar se llama aerofotografía o fotografía aérea. Igual denominación reciben en castellano las fotografías de este modo obtenidas. Las aplicaciones de la fotografía aérea a la construcción de mapas se puede llamar cartografía aérea. La ciencia de obtener medidas por medio de fotografías aéreas es la fotogrametría aérea. Aunque el geólogo no tenga necesidad de ser un fotogrametrista, deberá conocer algo de los fundamentos de esta ciencia.

Las aplicaciones de la fotografía aérea son inumerables. Tanto las fotografías por sí mismas como los mapas obtenidos a partir de ellas, tienen valiosas aplicaciones en ingeniería civil (urbanismo, construcción de carreteras, presas, ferrocarriles, embalses, trabajos portuarios, etc.) industria minera, ingeniería militar, exploración de territorios, agricultura, selvicultura, control de inundaciones, arqueología y diversas ramas de la geología y la geofísica.

PROCEDIMIENTOS DE VUELO

Para la fotografía aérea, el avión va provisto de una cámara concebida y montada con dicho objeto. Ordinariamente está dispuesta para operar a través de una abertura en el suelo de la cabina. La mayoría de las cámaras toman vistas de 23x23 cm (9x9 pulg), o de 18x23 cm (7x9 pulg), sobre placas o sobre rollos de película hasta de 25 y más metros. Para poner de manifiesto diferencias de coloración del terreno y reducir los efectos de la bruma, se utilizan filtros coloreados delante del objetivo, y las películas son pancromáticas.

Para levantamiento regional de una zona por medio de fotografías verticales, el avión se deliza a una altura media a lo largo de trayectorias paralelas y a nivel, separadas entre sí por una distancia tal que las fotos se superpongan en un 30% sobre las adyacentes tomadas antes, durante el mismo vuelo. Esto se llama recubrimiento. Si el vuelo se efectúa a una altura media de 5000 m, este 30%exige que las trayectorias paralelas estén separadas entre si unos 3 km. Las fotografías se toman automáticamente a intervalos tales que, a lo largo del recorrido, el recubrimiento sea del 60%. A la altura indicada, para obtener este resultado se ha de tomar una foto cada 1500 a 1600 m. Como es natural el control del obturador y la superficie de terreno cubierta están sometidos a variaciones que dependen de la distancia focal de la lente, de la altura media del vuelo, de la velocidad del avión, etc.

Un procedimiento que implica a la vez fotografías verticales y muy oblicuas es la aerofotografía trimetrógena. Para ello se montan en un avión tres cámaras combinadas, una de ellas ajustada para tomar fotografías verticales, y las otras (una a cada lado de la cámara vertical), ajustadas para tomar las

oblicuas, una a la derecha y otra a la izquierda de la línea de vuelo. A cada lado, la fotografía oblicua recubre en un amplio margen a la fotografía vertical. De este modo cada terna o tripleta da una vista completa del terreno - desde el horizonte de un lado del avión hasta el horizonte del lado opuesto.

A causa de la disminución del poder resolvente hacia el horizonte en las fotografías muy oblicuas, no se puede obtener información satisfactoria de la anchura total cubierta por la aerofotografía trimetrógena. Sólo es aprovechable la parte de las oblicuas cercana a la vertical central, de modo que, prácticamente la anchura máxima cubierta, cruzada por la línea de vuelo, es de unos 56 km. Dicho con otras palabras, para levantar por completo una región mediante la aerofotografía trimetrógena, las líneas de vuelo bastará que se hallen separadas entre si unos 56 km y, por consiguiente, la fotografía aérea por este método es mucho más rápida que la exploración por medio de la fotografía vertical; pero la trimetrógena es de menor exactitud. La aerofotografía trimetrógena es un método de reconocimiento para cubrir vastas superficies de un modo rápido (Fig. 53).

ERRORES Y DISTORSION DE FOTOGRAFIAS AEREAS:

Las fotografías aéreas, aún cuando se obtengan bajo las más favorables condiciones están sujetas a ciertas inexactitudes. Estas son debidas: 1).- a la dificultad de volar en línea recta, vertical y horizontalmente 2).- a la dificultad de evitar la inclinación del avión y, por lo tanto, de la cámara durante el vuelo.- 3).- al hecho de que todas las fotografías, hasta las obtenidas enfocando verticalmente hacia abajo, son siempre vistas perspectivas.

Provisto de un buen mapa aeronáutico como guía, y volando en buenas condiciones meteorológicas, entre 3000 y 4500 m sobre el nivel del suelo, un piloto experimentado puede mantener su trayectoria a menos de 1° de la dirección propuesta, y los cambios de altitud no excederán mucho de 30 m sobre una comarca llana o moderadamente ondulada. A niveles más bajos las condiciones atmosféricas suelen ser mucho más variables y, en consecuencia, el vuelo estable resulta difícil o imposible, Por esta razón la fotografía aérea raramente se intenta a menos de 2300 m. Cuando sopla viento contrario y el avión se desvía algo de su itinerario previsto, el efecto se llama deriva. Cada fotografía, aunque orientada correctamente por referencia a la línea de vuelo prevista, está un poco desviada hacia sotavento con respecto a la fotografía precedente (Fig. 58A). A causa de esta deriva del aeroplano, las líneas de vuelo contiguas, que se deseaba fueran paralelas, pueden ser convergentes o divergentes. Por el contrario, si el avión es mantenido en su trayectoria apropiada volando un poco hacia la dirección del viento, pero sin que se haya compensado ajustando la cámara a este ángulo de contraderiva, las sucesivas fotografías se hallarán desviadas formando ángulo con la dirección de vuelo. Esto se ha llamado crab o contraderiva (Fig 58B).

El ladeamiento o cabeceo del avión, causado por vientos variables y corrientes de convección del aire, resulta casi imposible de evitar. Esto puede producir algo de distorsión en las fotografías. No obstante está comprobado que, en fotografías tomadas entre 3000 y 4500 m sobre el terreno, volando con cuidado bajo condiciones satisfactorias, del 50 al 80% de las fotos están inclinadas menos de 1°, y rara vez lo están más de 3°. En los vuelos

SEGUNDA PARTE.

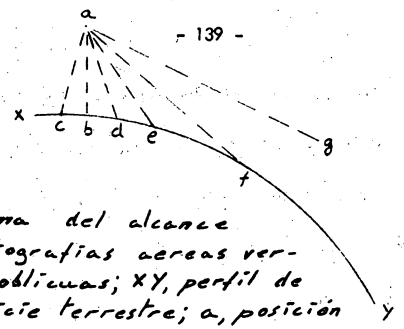


Fig.57. Esquema del alcance de las fotografías aéreas verticales y oblicuas; XY, perfil de la superficie terrestre; a, posición de la cámara en el aeroplano; b, punto de la superficie situado verticalmente bajo a; cd, superficie cubierta por una fotografía vertical; df, superficie cubierta por una fotografía oblicua baja; e, centro de la fotografía oblicua baja; eg, fotografía oblicua alta incluyendo el horizonte; f centro de la fotografía oblicua alta.

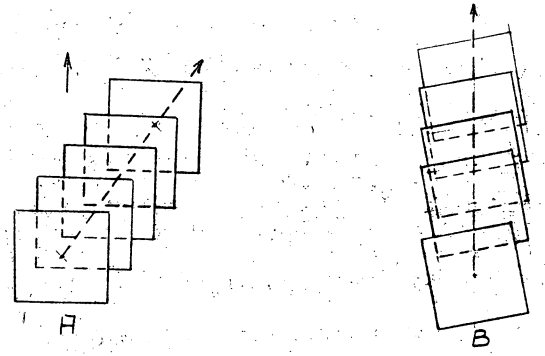


Fig.58. Posiciones relativas de las fotografías aéreas en el caso de deriva (A) y contraderiva (B). En el segundo caso se tiene ademas un recubrimiento insuficiente de las dos primeras fotografías.

Las flechas marcan la direcciónes recorridas por la línea de vuelo.

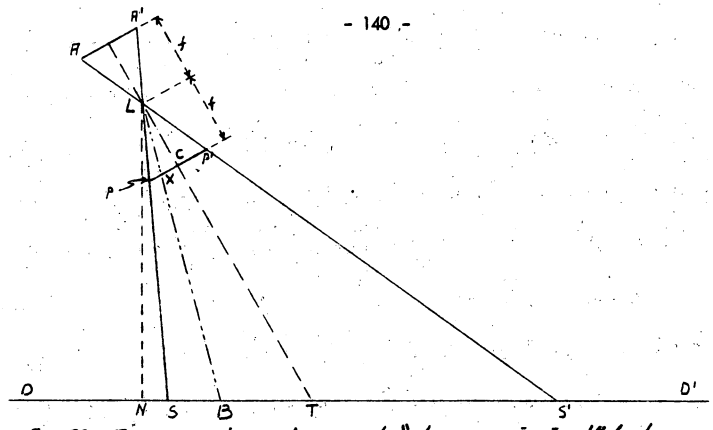


Fig.59. Esquema trazado en el "plano principal" (plano vertical que comprende el eje optico del objetivo y una linea a plomo trazada desde el objetivo). El objetivo se halla en L; el terreno es DD'; la superficie fotografiada se extiende entre S y S'; AA' es el negativo y pp' el positivo de la imagen; la distancia focal es f

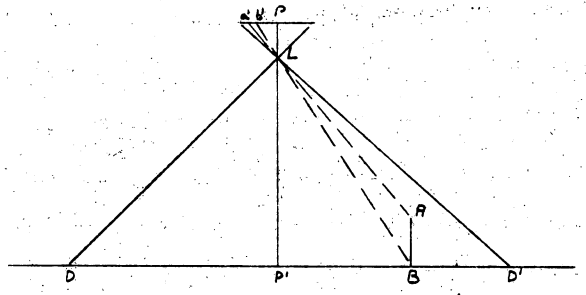


Fig.60. Esquema exagerado de la distorsión perspectiva en una fotografía vertical de grán angular. Se ve que los puntos A,B que en la realidad estan sobre una línea vertical, tienen una proyección horizontal sobre el negativo (linea a'b'

contratados, una tolerancia de 3° es la máxima permitida.

Las relaciones de inclinación son comparables a las de una fotografía oblicua baja, según se esquematiza en la figura No. 59 Se muestra en ella la posición del objetivo, del negativo y del terreno fotografiado. La posición de la positiva, PP', se halla a la misma distancia)distancia focal -LC) que el negativo detrás del objetivo. El eje de la cámara es LT, que sirve de bisectriz al ángulo de proyección, cubierto por la fotografía, SLS'. El punto C es el centro o punto principal de la imagen donde ésta es cortada por LT. El nadir, N, es un punto situado verticalmente debajo del objetivo. La bisectriz (LB) del ángulo (NLT) entre LN y LT corta a la imagen en un punto X, llamado isocentro. En una fotografía vertical, sin inclinación alguna, coinciden LN, LB y LT; pero, si está inclinada, existe un pequeño ángulo entre LN y LT y el punto situado sobre la plomada no coincide con el centro o punto principal.

Una fotografía tomada verticalmente hacia abajo contiene tan sólo un punto singular que se halla directamente debajo; es el punto de la plomada o nadir. Todos los objetos con dimensiones verticales no situados en el nadir están deformados, puesto que serán vistos en perspectiva. En otras palabras, una fotografía aérea es una proyección radial (o cónica) y no una proyección ortográfica, como todos los mapas trazados sobre el terreno. Podemos explicar ésto como sigue (Fig. 60): imaginemos dos puntos, situados verticalmente uno encima de otro; llamaremos al más alto A, y al mas bajo B. Si la cámara se coloca verticalmente encima de A, estará también verticalmente encima de B. Dicho de otro modo, una fotografía no mostrará aquí deformaciones que puedan atribuirse a diferencias de altura, Pero supongamos que la cámara se aleje a un lado de A,

de modo que los rayos de luz desde A (o desde B) entren en el objetivo siguiendo una trayectoria inclinada. Entonces los rayos procedentes de A llegarán a la película, dentro de la cámara, más lejos del centro de la imagen que los rayos procedentes de B. Es evidente que habrá deformación al fotografiar el terreno correspondiente a la línea vertical entre A y B, de acuerdo con la altura de este punto con respecto a la comarca circundante. Allí donde la superficie del terreno no es horizontal, todos los puntos que no se hallen directamente debajo del objetivo estarán más o menos desviados en la fotografía, y esta desviación se llama deformación perspectiva o deformación topográfica, la cual aumenta radialmente en todas direcciones desde el punto terminal de la plomada. Esta deformación será mayor en los objetivos granangulares con distancia focal corta que en los objetivos con ángulo de proyección pequeño y larga distancia focal. Por lo tanto, podemos decir que la cuantía de la desviación o corrimiento radial que implica la deformación topográfica será directamente proporcional al relieve de la comarca y a la distancia al nadir o punto terminal de la plomada, e inversamente proporcional a la distancia focal del objetivo de la cámara y a la altura desde la cual fue tomada la fotografía (Fig 61).

Puesto que las fotografías aéreas se toman desde un avión que vuela a lo largo de una trayectoria horizontal, la distancia vertical desde el objetivo al terreno varía según la topografía de éste. Podemos imaginar una superficie a nivel o plano de referencia, la cual se encuentra a cierta distancia, igual a la altura media del avión, por debajo del plano del nivel del vuelo. Las cumbres de las colinas se hallarán ~~por encima~~ del plano de referencia, y el suelo

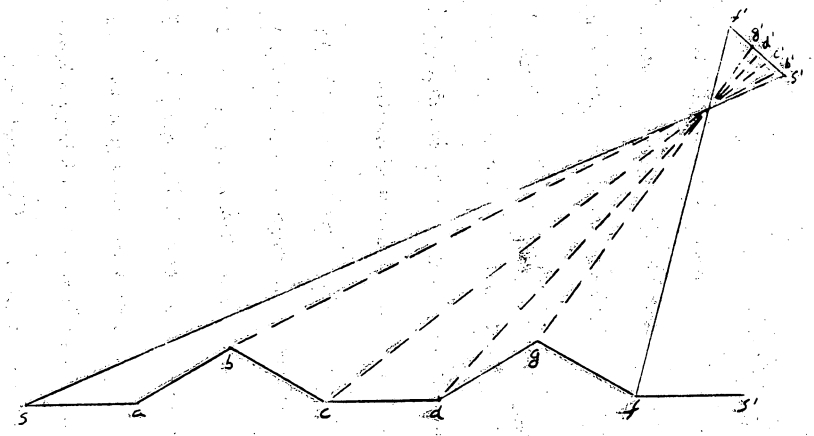


Fig. 61. Distorsión de las imágenes en fotografías aéreas debidas a el relieve topográfico.

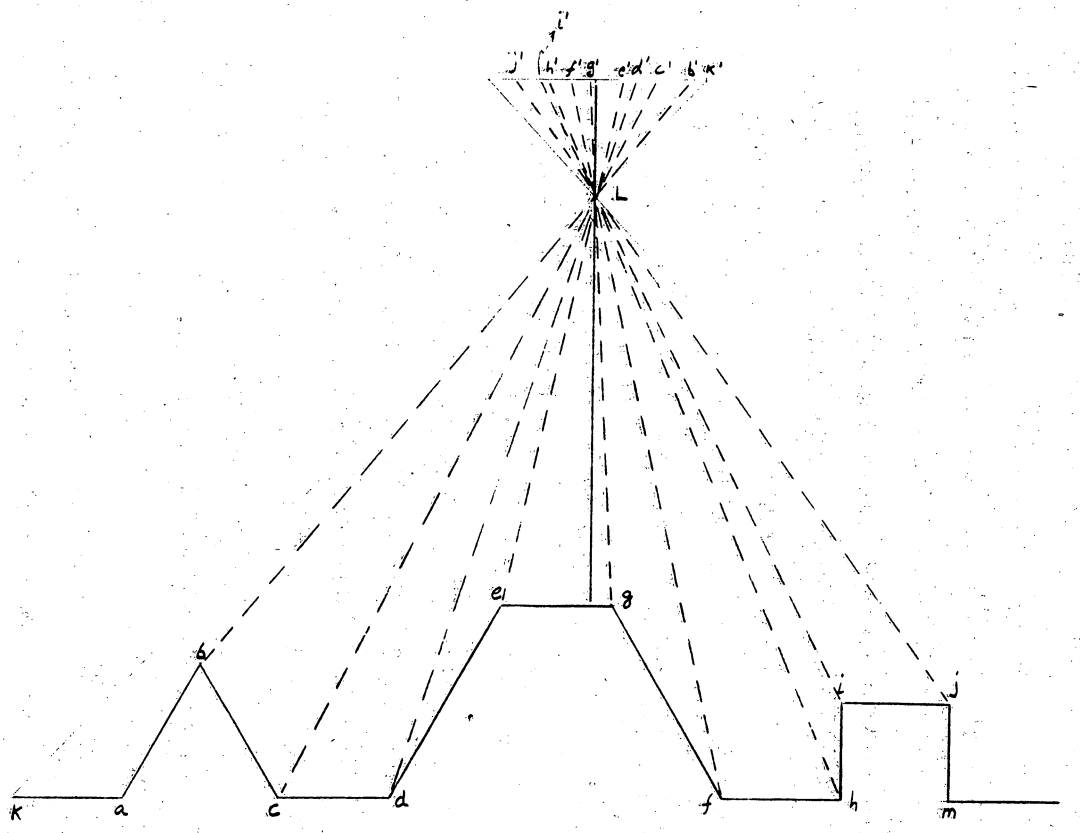


Fig. 62. Ejemplos de deformación topográfica y perspectiva
$ka = cd = eg = fh = ij$, pero $c'd' \neq e'g' \neq f'h' \neq i'j'$ y el punto a no aparece
$ab = bc$, pero $a'b'$ no aparece
$de = gf$, pero $e'd' \neq g'f'$
$ih = jm$, pero $j'm'$ no aparece

de los valles, por debajo de él. El corrimiento radial se efectuará hacia el punto de la plomada para todos aquellos puntos del terreno situados por debajo del plano de referencia y, en cambio, se alejarán de aquél, los puntos situados por encima del plano de referencia. La escala de las tierras altas será más grande que la de las tierras bajas. Esto es, una unidad dada de longitud sobre la fotografía representará una distancia que en el suelo será mayor si pertenece a tierras bajas que a tierras altas; pero donde el relieve es considerable, pendientes similares pueden aparecer diferentemente deformadas según que se hallen de cara a la cámara, opuestas a ella o formando cierto ángulo, y también según la distancia a que se encuentren. Así por ejemplo, las pendientes ab, bc; de y gf (Fig 62), son todas ellas iguales en área; pero ab, no aparece visible; bc será más corta que ef en la fotografía, aunque esté de cara al objetivo y ed, mirando en dirección opuesta al objetivo será mucho más corta que ef.

Al hacer uso de las fotografías aéreas se debe recordar que el área de menor deformación en las oblicuas es la más cercana al primer término, y en las verticales, la parte central de la imagen. Esta parte central de una fotografía vertical es la que H.T.U Smith ha llamado de recubrimiento efectivo, la cual -ha sido definida- como la zona más proxima al centro de una foto determinada que al centro de cualesquiera de las fotos contiguas-

MOSAICO DE CONTACTO:

Si las fotografías verticales de un vuelo, o de un grupo de vuelos paralelos contiguos, se hacen coincidir y se pegan sobre una base plana y rígida, de modo que cubran por completo la superficie, a una escala elegida, habiendo recortado los bordes coincidentes superpuestos, el conjunto se llama entonces mosaico, fotomosaico o fotomapa. Para un trabajo preliminar, las fotografías que componen tal mosaico se pueden recortar de forma rectangular con los bordes paralelos al de la película, pero, para obtener mejores resultados, los bordes se han de recortar a lo largo de líneas irregulares en las que la continuidad de los rasgos sea perfecta. Las pruebas se han de recortar a lo largo de tales líneas de cada fotografía con el fin de reducir el máximo detalle.

ESTEREOSCOPIO Y VISION ESTEREOSCOPICA.

Las pruebas de contacto por separado dan una apariencia plana al terreno; no muestran relieve. Pero si desde puntos de vista un poco diferentes se obtienen dos fotografías del mismo objeto, y las dos imágenes se presentan a nuestros ojos de modo que aparezcan superpuestas una a otra, el efecto es tridimensional, es decir, que los rasgos se presentan como en la realidad. El principio es escencilmente el mismo que en la visión con los dos ojos (visión bonocular), que ven al objeto en dos direcciones ligeramente diferentes.

Un par de fotografías superponibles, dispuestas para el examen estereoscópico, se llaman vistas apareadas o par estéreo. Tres de tales fotografías se pueden disponer de modo que la del centro sea totalmente recubierta en parte por la foto de uno de sus lados, y el resto de ella por la foto del otro lado; el conjunto se llama tripleta o terno estéreo. La zona de superposición, vista estereoscópicamente, se llama modelo espacial, o simplemente el modelo. Este modelo corresponde a la extensión en la cual es visible el efecto tridimensional o estereoscópico.

El instrumento empleado para el examen estereoscópico de imágenes se llama estereoscopio. Existen dos tipos de estereoscopios: con lentes y con espejos. El primer tipo va provisto de dos lentes, una para cada ojo, con algo de aumento, que es preferible no exceda de 2,5 veces. El tipo con espejos (Fig. 63) lleva cuatro espejos dispuestos a 45° con el plano de las fotografías. En este último no se aumenta la imagen a no ser que el instrumento vaya provisto de lentes auxiliares. Las ventajas del estereoscopio de lentes o de refracción son su menor tamaño, que lo hace más fácilmente transportable, y el aumentar las imágenes, pero su campo visual es más pequeño que en el estereoscopio con espejos. Este último suele ser bastante capaz para que quepan dentro de su campo visual dos pruebas de 23 x 23 cm. Un pequeño estereóscopo plegable, de bolsillo, es casi una parte escencial del equipo de un geólogo de campo.

CONTROL Y CORRECCIONES DE FOTOGRAFIAS AEREAS.

Para su más eficaz empleo, las fotografías aéreas -tanto aisladas, como combinadas o mosaicos- deben ser cuidadosamente sometidas a un control minucioso sobre el terreno explorado. Tal control del terreno está de ordinario enlazado al establecimiento de vértices geodésicos ~~o de puntos del Servicio Hidrográfico en los Estados Unidos, el Coast and Geodetic Survey~~, tanto para la localización horizontal como para la altitud sobre el nivel del mar.

Cuando la precisión es necesaria se pueden invocar las condiciones o características del vuelo para ciertos límites definidos de error en el

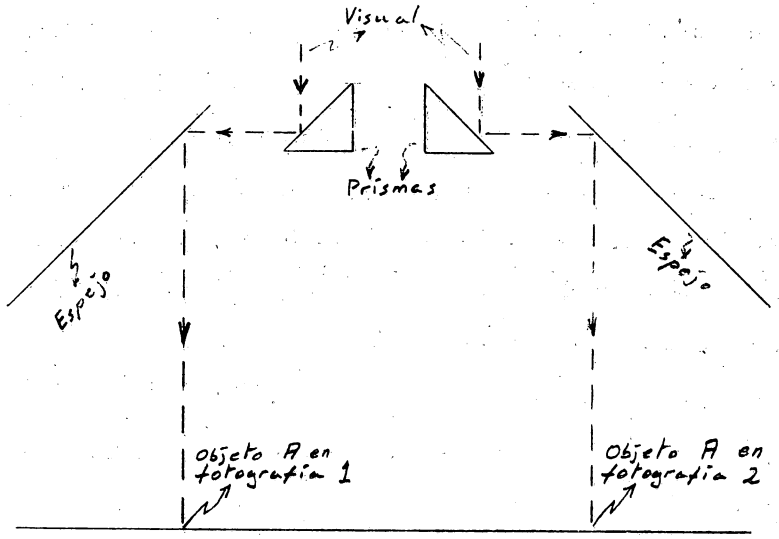


Fig N.° 63. Vista de elevación esquematizada de un estereoscopio de espejos

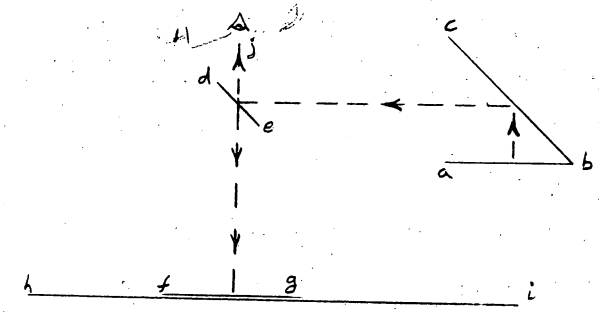


Fig N.° 64. Principio del sketch-master
ab- fotografia aérea montada en un soporte
bc- espejo opaco ajustable
de- espejo semitransparente
fg- imajen de ab sobre la mesa hi donde se ha fijado el mapa
j- apunta hacia el ojo del observador cuando percibe la visión de ab. la cual parece proyectarse sobre hi en fg permitiendo así pasar rasgos de la fotografia al plano.

proceso de la fotografía aérea. Por ejemplo, si la tolerancia de inclinación está limitada a 3°, alguna fotografía que muestre más de 3° de inclinación deberá ser tomada en cuenta de nuevo. No obstante, la corrección de la inclinación se puede llevar a cabo por un procedimiento que consiste en proyectar el negativo, cuidadosamente orientado en la posición que fue tomado, sobre una hoja de papel sensible colocada horizontalmente. Esta operación se llama rectificación De la misma manera, una fotografía oblicua puede ser rectificada, es decir, convertida en vertical, procedimiento seguido en el caso de fotografías compuestas en que entran oblicuas (trimetrógonas, etc.)

Las fotografías aéreas se pueden dividir en controladas e incontroladas. Las primeras son referidas siempre a estaciones de control sobre el terreno y fueron corregidas de escala, inclinación y deformación perspectiva. Las incontroladas no fueron corregidas de deformación ni ajustadas a las estaciones de control sobre el terreno. Pueden ser parcialmente controladas, por ejemplo, cuando un ensamblamiento o mosaico de fotografía ha sido corregido de inclinación, pero no fue ajustado a un control del terreno.

RESTITUCION.

Uno de los instrumentos fotogramétricos más sencillos es el estereómetro (sketch-master), el cual consiste en escencia, en una cámara clara por su principio constructivo. No es raro que sea utilizado por el propio geólogo cuando desea transportar detalles de la fotografía aérea a un mapa de base. Puede ajustarse a la escala, y la corrección de inclinaciónes posible por alargamiento o acortamiento de uno o más de los tres pies del armazón del instrumento. Estos ajustes, en el llamado -estereómetro universal-, tienen suficiente amplitud para permitir el transporte de detalles de una fotografía oblicua a su posición correcta en la hoja horizontal del mapa. La figura # 64 explica el principio de este instrumento, para el caso en que se han de trasladar líneas de una fotografía vertical a un mapa planimétrico de base horizontal.

El ajuste al sistema de vértices o mojones, y al mismo tiempo la corrección aproximada de deformación paraláctica en las fotografías verticales, se pueden llevar a cabo por alguno de los diversos métodos de proyección radial o de líneas radiales, los cuales se basan en los principios generales de intersección directa e inversa en la triangulación.

Los métodos de proyección radial para la construcción de un mapa planimétrico a partir de fotografías aéreas no son muy exactos. La mayoría de los especialistas de fotogrametía, que se ocupan de técnicas de precisión los consideran de valor para reconocimientos. Sin embargo, como base de mapas geológicos, estos métodos radiales de restitución pueden ser adecuados.

Una mayor precisión se obtiene empleando los llamados "multiplex" y otros mecanismos similares, los cuales pertenecen a la categoría de instrumentos de precisión.

VI- 1: FOTOGEOLOGIA

Las fotografías aéreas son de inestimable valor para muchos trabajos geológicos, topográficos y fisiográficos. Presentan a vista de pájaro el aspecto de la superficie terrestre; la forma y distribución de las formas del terreno; la distribución y grandes rasgos de rocas y suelos; lamanera de presentarse las rocas estratificadas; forma, rumbo y relaciones de los pliegues; posición

y relaciones de las fallas; y finalmente, las relaciones de carreteras, ferrocarriles y otras construcciones humanas con estos fenómenos naturales; en suma. una riqueza de detalles que no puede competir con los métodos de prospección del terreno, y estas fotografías aéreas, con todos sus detalles, pueden ser hechas y corregidas y reunidas en mosaicos para su estudio en menos tiempo del que sería necesario para el levantamiento por los métodos ordinarios de prospeección. Con frecuencia, tales fotografías pueden revelar rasgos geológicos que serán completamente ignorados en exploración de campo.

El estudio de fotografías aéreas y de mapas construídos a partir de tales fotografías para información geológica se llama "Fotogeología" y un geólogo que se especialice en este estudio es un fotogeólogo. Este debe estar bien adiestrado en los principios de Geología; debe de ser un geólogo con experiencia de campo que conozca a rocas, estructuras y formas topográficas y su significación y que, asimismo, pueda trasladar las expresiones superficiales de estos fenómenos en su manifestación subterránea. Al propio tiempo deberá tener un conocimiento completo de aquellas vías siguiendo las cuales puede ser ayudado en su trabajo por la fotogrametría.

Para comprender las fotografías aéreas con vistas a su interpretación geológica, el geólogo debe aprender a reconocer carreteras, ferrocarriles, casas, aguas, diversas clases de vegetación, trayectoria de las corrientes, pendiente, etc., tal como aparecen sobre las fotografías. La mayoría de las carreteras suelen ser muy irregulares, o trazadas con arreglo a una pauta rectangular. Excepto en las carreteras reales, muy bien niveladas, suelen existir revueltas angulares muy bruscas. Por el contrario, los ferrocarriles giran describiendo curvas suaves. Casas y otros edificios son visibles por las sombras que proyectan. En algunas fotografías se ven sombras arrojadas por árboles y, en especial, por colinas y escarpados en tierras de fuerte relieve, pudiendo ocultar algunos importantes aunque menos visibles rasgos geológicos. Asi mismo, pueden ser desconcertantes las sombras de las nubes. Por estas razones, las fotografías deben ser tomadas en las horas centrales del día y con tiempo perfectamente claro, y en la confección de mosaicos las fotografías contiguas no tendrán ángulos de sombras contradictorias. Las sombras contenidas deberán ser mínimas . Las fotografías aéreas no serán impresionadas en comarcas montañosas cuando las sombras sean bastante largas para llegar a a travesar los valles hasta las laderas opuestas.

Las aguas lacustres, si están en calma, pueden ser negras o de color gris obscuro, pero si están rizadas por la brisa aparecerán blancas o de color gris claro. Los cursos de las corrientes, de ordinario se ramifican aguas arriba, indicando de este modo la dirección de la pendiente general que determinan. La brusquedad en las diferencias de altitud se puede comprobar frecuentemente por referencia a las corrientes de agua si se recuerda que los cursos maduros y viejos tienen desnivel uniforme, pero los jóvenes se caracterizan por cambios de altitud repentinos, y, a veces considerables a lo largo de su cauce.

La vegetación -bosques, prados, matorrales, campos cultivados, etc.- tiene variada apariencia en las fotografías aéreas. Estas diferencias se podrán acentuar por el uso de filtros, viéndose bajo la forma de cambios en la tonalidad si se trata de pruebas en blanco y negro. Esto merece una atención cuidadosa, debido a que la vegetación está estrechamente relacionada con la

roca viva infrayacente, de modo que el estudio de las fotografías al apreciar características que dependen de la clase y distribución de la vegetación, puede ayudar al desciframiento de la Geología.

Las fotografías aéreas se pueden utilizar de diversos modos por el geólogo. Una fotografía de éstas puede servirle: 1) como guía general para el trabajo de campo; 2) para interpretación directa de la Geología; 3) como base para levantamiento de campo; 4) para trazado de curvas de nivel; 5) para curvas de nivel estructuradas, ó 6) para construcción de cortes estratigráficos. Para alcanzar estos fines puede emplear pruebas de contacto aisladas o en grupos, o trabajar con mosaicos.

Fotografías aéreas se pueden utilizar para la interpretación directa de la Geología. Si los estratos aparecen bien al descubierto e inclinados más de 10° ó de 15°, la dirección de su buzamiento puede resultar evidente a partir de como están inclinados los contactos y las capas en los valles. Un fotogeólogo experimentado si está ayudado por el estereóscopio, puede hacer clara estimación de la cuantía del buzamiento de las rocas estratigráficas, con tal que las fotografías aéreas tengan muy poca inclinación. "Los buzamientos observados en el estereoscopio invariablemente aparecen más fuertes que su verdadera inclinación. Esto, como es natural, sirve de ayuda en una comarca donde el buzamiento es extraordinariamente escaso, pero constituye una fuente de confusión en zonas donde el buzamiento es muy fuerte. No obstante, los buzamientos entre 3 y 20° , pueden apreciarse ordinariamente con un razonable grado de precisión", después de haber adquirido

alguna práctica comprobando su verdadero buzamiento en el terreno. "Los buzamientos que varían entre 20 y 45°, serán estimados con un error de menos de 5°, mientras que los buzamientos desde 45° hasta cerca de la vertical, son difíciles de estimar con aproximación de 10° más o menos de su verdadero valor". Algunos fotogeólogos admiten que los buzamientos de más de 40 ó de 45° no se pueden estimar con seguridad a partir del modelo espacial o estéreo. Buzamientos tan altos como de 75° se pueden ver verticales, o incluso vueltos boca abajo. Puesto que la deformación radial aumenta hacia los bordes de la fotografía, la estimación del buzamiento no se intentará demasiado lejos de la zona central.

Los pliegues, tanto anticlinales como sinclinales, serán claramente demostrados en las fotografías aéreas por el rumbo de los estratos y su inclinación, que buza hacia abajo en los valles.

Fallas, tal vez invisibles en el terreno, pueden ser descubiertas en saliente. Sistemas de diaclasas se pueden destacar muy vigorosamente.

INTERPRETACION DE FOTOGRAFIAS AEREAS

Para identificar un objeto en la fotografía, se debe prestar atención a los siguientes rasgos de su imagen; 1) forma, 2) tamaño, 3) pauta, 4) sonbra, 5) tono, 6) textura y 7) relaciones.

La forma de un objeto, tal como un edificio, puede identificarse fácilmente. Las cosas debidas a la mano del hombre tendrán formas características, pero algunas formas de la naturaleza serán más difíciles de reconocer. Se puede a veces identifcar el tamaño del objeto comparándolo con otros conocidos que aparezcan en la fotografía, o estudiando las sombras que arroja. La pauta es particularmente importante, pues se dice frecuentemente que la naturaleza nunca hace una línea recta, ni divide en espacios regulares. Por tanto, se puede determinar de la pauta o peculiar distribución de los objetos en la foto-

graffa, si el objeto es natural o debido a la mano del hombre. Las sombras ayudan a determinar el tamaño, y la forma del objeto se puede adivinar frecuentemente por el perfil de la sombre que produce. El tono indica la cantidad de luz refrejada por el objeto; por ejemplo, un tipo de tierra que tenga un tono muy oscuro puede indicar que se trata de tierras muy mojadas, impermeables o un nivel hidrostático muy alto, mientras que las tierras de tonos claros, pueden indicar aridez. La textura de una imagen fotográfica, se puede definir como -la frecuencia del cambio de tono en esa imagen. La textura se produce por un agregado de rasgos unitarios demasiado pequeños para poderse discernir individualmente en la fotografía-. La relación de un objeto con otros que aparecen en la fotografía puede ayudar a identificarlo; por ejemplo, una masa de agua limitada en un extremo por una línea recta puede indicar una presa.

Cuando se ha terminado este primer examen de la fotografía que se acaba de describir, se analiza ésta desde el punto de vista geotécnico. Se deben estudiar para ello, los siguientes rasgos: 1) forma del terreno 2) pauta de la red hidrográfica, 3) forma y gradiente de los barrancos, 4) cobertura vegetal y 5) cultivo o tierras utilizadas por el hombre.

La forma del terreno permite frecuentemente la identificación del tipo de suelo y su origen. Por ejemplo, la superficie del terreno formado por loes es una repetición de colinas idénticas o parecidas, con una serie de lomas paralelas.

La configuración de la superficie del terreno y la pauta de la

red hidrográfica indica que se trata de loes, mientras que las formas peculiares, se deben a las dunas.

Una superficie horizontal del terreno sola no indica el terreno de que está formada. Este puede ser una roca sedimentaria; si se ven en la superficie del terreno dolinas, un estudio más amplio puede indicar la presencia de calizas. En regionaes que han experimentado una erosión considerable, quedan islas aisladas de rocas sedimentarias, de forma irregular y bastante altas en la superficie, por lo demás, horizontal, del terreno.

El gradiente de las laderas, sobre todo en la proximidad de las corrientes de agua donde el declive tiende a ser más fuerte y a estar erosionado por la acumulación de agua de escorrentía, puede indicar el carácter del suelo. Los terrenos detríticos, como gravas y arenas (y, naturalmente, las rocas), tienden a formar fuertes pendientes; en el caso de declives más suaves, se puede esperar encontrar un contenido alto de arcilla en el suelo. Cuando se buscan terrazas fluviales como fuente de grava y arena, las zonas con declives ondulados y muy suaves no deben, normalmente, tomarse en consideración.

Como se ha dicho más arriba, por el tono en la fotografía, se puede determinar el contenido de agua del suelo. Los colores muy oscuros en un terreno relativamente llano, pueden indicar que el agua está cerca de la superficie y la vegetación, por tanto, es bastante frondosa. Por el contrario, las zonas muy claras o incluso blancas en la fotografía y la escasez de vegetación, pueden indicar que cabe esperar un grado de humedad bajo y aguas freáticas muy profundas.

INTERPRETACION DE LA DISPOSICION DE LA RED HIDROGRAFICA Y DE LA FORMA DE LA EROSION.

El agua en movimiento erosiona la superficie del terreno y produce redes hidrográficas, es decir, sistemas de corrientes de agua o de corrientes y barrancos, grandes y pequeños. La forma o disposición de la red hidrográfica es característica de un suelo, de una roca o de un complejo de varios terrenos dados, y un cambio del suelo o de la roca tipo da lugar a un cambio en la forma de la red (Fig. 65).

La red hidrográfica dendrítica (arborecente o en forma de árbol), se desarrolla en rocas horizontales homogéneas y manifiesta una uniformidad en todas direcciones. La red puede estar considerable o ligeramente desarrollada, según el tipo de roca sobre la que se ha formado; la red dendrítica en el granito, por ejemplo, es mucho más simple que en las pizarras.

La disposición de espaldera puede compararse con un frutal de espaldera (forma de viña) y se desarrolla generalmente en rocas plegadas, o buzando, con una serie de fallas paralelas. Los tributarios primarios de la corriente de agua principal son largos y rectos, y frecuentemente paralelos entre sí y a la corriente principal. Los tributarios secundarios son cortos y tiesos y generalmente cortan a los tributarios principales en ángulo recto. La red hidrográfica radial consiste en una serie de corrientes que fluyen radialmente de un centro (por ejemplo, un cono volvánico) o hacia él (por ejemplo, una cubeta). En la red paralela, las corrientes son casi paralelas entre sí (disposición que se ha llamado cauda equina, o "cola de caballo"). Estas redes pueden desarrollarse en terrenos bastante sueltos., más o menos homogéneos, como los rellenos de valles. En una disposición anular, las corrientes principales son radiales y los tributarios son anulares, corriendo alrededor de un domo, por ejemplo. Las corrientes que siguen las fallas y grietas en rocas fracturadas producen

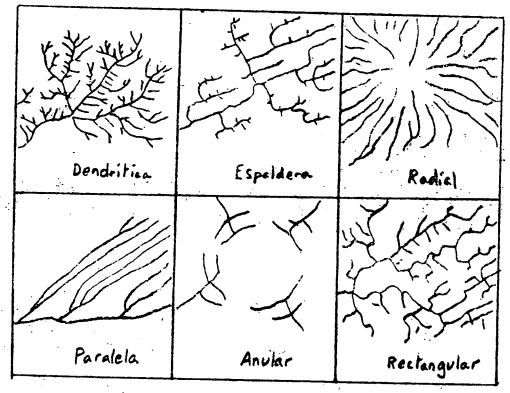


Fig. 65. Disposición basica de la red hidrográfica.

una red rectangular. La llamada disposición angulada (que no es básica) es una variación de la red en espaldera, pero, como la rectangular, refleja la influencia de las diaclasas.

En las redes hidrográficas se distinguen fácilmente las corrientes y sus tributarios. Si los tributarios están muy próximos entre sí, los suelos y rocas locales tienen poca resistencia a la erosión (pizarras arcillosas, limos o arcillas arenosas). Por el contrario, si están muy espaciados, la capa de tierra o la roca subyacente es resistente a la erosión y consiste, por ejemplo, en areniscas, depósitos granulares o acarreos glaciares sin consolidar. En todo caso, cualquier criterio que se base en la separación de las corrientes de agua, debe tener en cuenta la topografía de la zona y la precipitación en la misma. El relieve abrupto con mucha precipitación tiende a acercar los tributarios entre sí aun cuando éstos fluyan sobre rocas muy resistentes. Por el contrario, el relieve muy suave combinado con una precipitación pequeña (por ejemplo, en los desiertos), dá lugar a una gran separación entre los tributarios, aunque el suelo ofrezca mínima resistencia a la erosión. Tan pronto como se ha establecido una relación entre determinada disposición de la red hidrográfica (sin que importe su nombre científico) y la roca o la capa de suelo, las disposiciones semejantes en la misma región indican terrenos semajantes.

El corte de los barrancos no es el mismo en suelos diferentes. Los barrancos en suelos granulares son cortos y tienen bastante pendiente y en corte normal presentan forma casi triangular. Con limos y loes, los barrancos son de sección rectangular, con gradiantes compuestos, muy pendientes al principio y luego suaves. Los barrancos en arcillas son largos y suaves y su sección es también suave y curvada. También aquí pueden influier la topografía y la precipitación en la forma de los barrancos de tal forma que puede invertir-

se el criterio que se acaba de exponer.

A excepción de los barrancos representados, no se desarrolla una red hidrográfica sistemática en las zonas cubiertas de arena, incluyendo los kames y éskeres. La ausencia de una red hidrográfica regular indica generalmente un alto grado de permeabilidad en cierto radio (o posiblemente la ausencia total de precipitación).

VII RECORRIDOS DE CAMPO Y TRABAJOS PRELIMINARES

Cuando se presenta por primera vez la idea de una obra de ingeniería, casi siempre se visitará el lugar de su emplazamiento para una primera inspección y se obtendrán todos los mapas topográficos existentes para su estudio en la oficina. A medida que se desarrollan los planes, serán precisas unas investigaciones más detalladas y posiblemente más extensas, así como el levantamiento de mapas más exactos; apoyándose en estas investigaciones, podrán empezarse los estudios económicos y considerarse la factibilidad del proyecto. Por último, si se decide llevarlo a la práctica se preparatán los planes detallados, se redactarán los necesarios contratos y dibujos, se sacará a subasta y se adjudicará a uno de los contratistas, comenzándose inmediatamente las obras.

Un complemento absolutamente asencial de estos estudios topográficos preliminares, es el estudio igualmente cuidadoso de los estratos geológicos que se encontrarán en la excavación y que se utilizarán como lechos de cimentación y como materiales de construcción. El procedimiento a seguir en esta parte de lainvestigación preliminar es igualmente directo y simple en sus puntos esenciales.

Puede aprovecharse el reconocimiento general del lugar de emplazamiento para examinar brevemente los rastos más sobresalientos de la geología local.

Es muy frecuente)excepto para los lugares más remotos) que exista ya un conocimiento más exacto de la geología local en forma de informes geológicos publicados. Por tanto, el verdadero estudio del emplazamiento puede muy bien comenzar en una biblioteca. Como es natural, se consul-

tarán ante todo los informes del respectivo servicio geológico nacional.

El paso siguiente es el estudio de los informe sgeológicos de obras adyacentes. Para obras urbanas es de gran utilidad, pero en el caso de sitios aislados es posible que no existan informes precios. Con frecuencia puede resultar muy útil obtener todos los datos existentes de los sondeos que se hayan practicado en el área de la obra proyectada.

Cuando se ha obtenido y estudiado toda esta información, el paso siguiente escencial es el examen sobre el terreno. En tiempos pasados, ésto significaba la visita de dicho punto, pero actualmente puede hacerse una primera aproximación con la ayuda de fotografías aéreas.

Después de este estudio, que reducirá el número de posibles emplazamientos de las obras y el área que debe ser estudiada, hay que comenzar los estudios de campo. Debe hacerse ante todo la investigación geológica del área, que frecuentemente, en localidades remotas, se es simultánea con los levantamientos topográficos, pero con personal diferente. Estos estudios, naturalmente están a cargo de un geólogo, pero con los ingenieros deben conocer, al menos, en sus líneas generales este trabajo cuyos resultados van a utilizar, por lo que lo describiremos en una sección posterior.

En el trabajo de campo no sólo se estudiarán las rocas y los suelos, sino también el agua subterránea, su situación, calidad e impurezas que contiene. Cuando se sospeche que los suelos tengan un alto contenido de sulfatos, su determinación es verdaderamente importante. Es corriente hacer pruebas de laboratorio con las muestras de suelo y roca obtenidos durante el curso del trabajo. En las obras grandes, puedetambién ser necesario hacer pruebas en

el campo de los suelos y rocas, ya sea en la superficie existente del terreno o en pozos, túneles o excavaciones especiales. Y en casos muy poco comunes, serán precisos procedimientos extraordinarios, tales como ensayos de excavaciones, pruebas de rellenos, inyección de agua para determinar la permeabilidad in situ o ensayos de inyección de cemento.

En la práctica, los detalles variarán, como es natural, de un caso a otro y la extensión del trabajo preliminar dependerá del tamaño de la obra y de su situación. La marcha general, sin embargo, es siempre la misma; primero, la búsqueda de toda la información impresa existente; segundo, estudio del lugar, primero, mediante fotografías aéreas (si existen) y luego sobre el mismo terreno, utilizando para ello todas las técnicas de la investigación geológica y de la exploración geofísica; tercero, desarrollo de un programa de sondeos basado en los resultados obtenidos y comprobados continuamente a medida que se aclara la imagen geológica local para conseguir las máximas ventajas de cada sondeo; y, por último, se harán las pruebas especiales e investigaciones que el trabajo efectuado sugiera necesarias en relación con la estructura que va a construirse.

VII-1: TRINCHERAS Y POZOS A CIELO ABIERTO.

Otro medio de investigar los depósitos superficiales son las calicatas, excavaciones lo suficientemente grandes para que un hombre pueda trabajar cómodamente dentro de ellas.

Es muy limitada la profundidad que razonablemente pueden alcanzar, por lo que su uso principal es la investigación de depósitos relativamente poco profundos, en particular los de grava, arena o arcillas utilizables en construcción. Tienen la ventaja de que los depósitos cortados, pueden exa-

minarse con facilidad in situ, y, caso necesario, extraer del fondo muestras no alteradas. Permiten también ver las condiciones en que se halla el agua subterránea, pero, como es natural, solamente pueden emplearse en terrenos secos. Para las exploraciones extensas, las calicatas resultan generalmente más costosas que los sondeos, pero en trabajos de menor importancia para los que habría que adquirir especialmente un equipo de sondeo, pueden ser a veces más económicas.

Cuando se emplean calicatas para investigar depósitos superficiales de materiales de construcción, es necesario tomar muestras regulares de los mismos, lo cual no siempre recibe la atención que merece, pues debe recordarse que no se trata, como algunos se imaginan, de reunir al azar una colección de pequeñas cantidades del material. La toma de muestras tiene dos fines importantes 1) obtener muestras típicas de las condiciones medias del material investigado y 2) obtener muestras que representen las características extremas del material.

Por tanto, cuando se investiga un material que ha de usarse en construcción, es preciso tener en cuenta ambos fines, aunque el primero es el más importante, a no ser que el material sea de composición muy variable. Las muestras se tomarán a intervalos regulares en los materiales de igual aspecto y luego entre un gran número de esas muestras, cuidadosamente mezcladas, se tomarán una o más que representarán el tipo medio. Estas últimas se usarán para hacer los ensayos, pero siempre acompañadas al menos por un ejemplar no mezclado, elegido como típico de la capa que se estudie, con objeto de comprobar la exactitud de las muestras medias obtenidas. Por supuesto, este procedimiento se aplicará únicamente a los materiales que pueden mezclarse con faci-

TABLA Nº 5

METODO DE EXPLORACION SUBTERRANEA

Nombre del método.	Terrenos en que se emplea.	Método de perforación	Toma de testigos	Valor para investigar lechos de cimentación.
Pozos de reconocimiento.	Todos los suelos; si existe agua hay que emplear una cámara de aire comprimido o desaguar el pozo.	Generalmente excavación a mano en pozo revestido o debajo de la cámara de aire comprimido.	Muestras tomadas a mano, de su posición original en el terreno.	El más valioso, pues los materiales se examinan in situ y se obtienen fácilmente muestras adecuadas.
Con punzón a mano.	Suelos someros por encima de la roca firme.	Hincando una barra de acero hasta alcanzar la roca.		Sólo para localizar la roca viva a escasa profundidad.
Barrena de mano.	Suelos coherentes y los granulares por encima del nivel hidráulico subterráneo.	Girando la barra hasta que se llene su cuchara.	Obtenidos del material que llena la cuchara de la barrena.	Satisfactorio en exploraciones someras, para caminos, edificios pequeños, etc.
Perforación con agua a presión.	Todos, excepto los más compactos (no penetra cantos rodados)	Inyectando agua en el interior de un tubo de revestimiento.	Recogidos en el sedimento del agua de lavado.	Casi sin valor y muy expuesto a dar resultados engañosos.
Con agua a presión dejando un núcleo central.	Todos, excepto los más compactos (no penetra cantos rodados)	Inyectando agua en el interior de un tubo de revestimiento.	Con un tubo o cuchara especial.	El más útil de los métodos económicos; permite la clasificación exacta de los suelos y hacer ensayos de penetración.
Tubo sacatestigos Shelby	Todos excepto los más compactos (no penetra cantos rodados).	Forzando el tubo de acero Shelby a penetrar en el terreno por un medio adecuado.	Testigos recogidos en el interior del tubo Shelby	El mejor método para el muestreo de suelos.
Sondeos de testigo contínuo.	Todos los materiales sólidos como la roca firme y los cantos rodados	Girando un tubo sacatestigos con corona de diamantes, granalla o de dientes de acero.	Testigos cilíndricos en el interior del tubo sacatestigos.	El mejor para estudiar la naturaleza de la roca y de los grandes cantos.

lidad, y no, por ejemplo, a una arcilla tenaz, de la que será preciso escoger muestras individuales. Todas las muestras se marcarán cuidadosamente con todos los datos conocidos del lugar donde se han recogido; pocas cosas hay tan desesperantes como tener una buena serie de muestras cuya identificación resulte imposible.

En casos excepcionales, también pueden usarse túneles en las labores de exploración, que casi siempre se sitúan de forma que puedan ser utilizados posteriormente en la excavación de la obra o de alguna otra forma. En algunas estaciones hidroeléctricas subterráneas, por ejemplo, se han utilizado los túneles de exploración para la salida de la línea eléctrica de alta tensión.

El fin perseguido es, sin embargo el mismo que en el más simple sondeo o pozo: determinar por el examen visual del suelo o de la roca in situ, o por la obtención de buenas muestras, la exactitud de las deducciones geológicas preliminares. Esto es un paso más para construir la imagen completa del subsuelo que proporcionará la información esencial necesaria para la redacción del proyecto y para el conocimiento de las condiciones que se encontrarán durante las operaciones de construcción.

VII-2: SONDEOS DE RECONOCIMIENTO

Como es natural, los métodos adoptados para atravesar terrenos sueltos son diferentes de los que exigen las rocas sólidas, aunque no es raro emplearlos juntos en la misma perforación.

Debe fijarse desde un comienzo, el fin perseguido por las investigaciones subterráneas, que sólo en casos especiales se propondrán averiguar simplemente la profundidad de la roca firme; Como regla general es también necesario identificar el material atravesado antes de alcanzar la roca, no sólo por lo que

este conocimiento afecta a los métodos de construcción, sino también para la preparación del proyecto, sobre todo cuando sea preciso cimentar las obras en terrenos sueltos. Cuando los cimientos sean importantes y se haga necesario excavar en roca, también es preciso conocer la naturaleza de la roca que penetra el sondeo. Normalmente, por tanto, el objetivo de la investigación preliminar no es sólo la obtención de datos acerca de los límites en el subsuelo de materiales escencialmente distintos, sino también la toma de muestras de dichos materiales para su análisis y ensayos en el laboratorio. En vista de la atención que actualmente se dedica a los ensayos de arenas y arcillas, es casi siempre de la mayor importancia conseguir muestras relativamente poco alteradas.

El tipo más simple de exploración en terrenos sueltos consiste en introducir en ellos una barra de acero; en terrenos someros, puede explorarse a veces la profundidad de la roca viva en limitadas profundidades. El escalón siguiente es el uso de la barrena giratoria de mano, que puede estar provista de diversos artificios especiales para penetrar diferentes clases de terrenos y para obtener muestras que, aunque no salgan enteras, son frecuentemente satisfactorias para los primeros ensayos preliminares en el laboratorio. Se obtienen las muestras retirando la barrena del pozo que ha excavado y lavando el material que se ha adherido a ella. Las perforaciones en arena tienen que ser revestidas con tubos, pero existen barrenas y sondas especiales para obtener testigos en este tipo de labor. Una barrena de este género, con sus accesorios usuales y capaz de perforar hasta 9 m, pesa menos de 45 kg. con su embalaje y es relativamente barata. Es extraño que no se use más a menudo, al menos para obras de poca importancia.

La barrena de mano puede ser substituída por otro tipo de sondeo, muy usado en el pasado por los ingenieros, y que consiste en perforar por percusión y una tubería que se introduce en el suelo conforme se ahonda, y en la que se inyecta agua, que luego al salir arrastra las tierras cortadas, las cuales se examinan e identifican (si es posible) en el balde donde se recoge el agua. Este método puede ser útil en algunos casos para localizar la superficie oculta de la roca, pero para la investigación de terrenos sueltos es peor que inútil, pues induce a errores. El material penetrado sale completamente roto y con la mayoría de material fino desaparecido por arrastre; tampoco dan idea de las condiciones del agua.

Una simple modificación de este método lo hace mucho más satisfactorio. La perforación avanza como en el método anterior, pero la inyección de agua se interrumpe a ciertos intervalos (determinados por la naturaleza del subsuelo) con objeto de introducir un tubo de forma especial, que se fuerza a penetrar en el material intacto del fondo y se retira con el testigo cortado. Después se continúa inyectando agua hasta que se quiera obtener otro testigo, y así sucesivamente. Este método presenta también la ventaja de no revelar inmediatamente la forma en que se encuentra el agua en el subsuelo.

Asi mismo, el fondo de los sondeos con inyección de agua está tan removido que es preciso penetrar profundamente con el aparato sacatestigos para asegurarse de que una buena proporción del testigo obtenido conserva su condición natural. Los aparatos para sacar muestras o testigos han progresado considerablemente desde que los avances de la mecánica de suelos confirmaron la necesidad de obtener muestras no alteradas.

Existen ahora una serie de excelentes instrumentos para obtener

buenas muestras de todos los principales tipos de suelos, pero en suelos friables es útil el "sacatestigos Dennison", en el que unas placas, retenidas por muelles, evitan la pérdida del testigo.

La necesidad de conseguir muestras en sus condiciones naturales es consecuencia de la vital importancia que puede tener la verdadera densidad de los suelos in situ; si se encuentran en estado suelto, pueden causar dificultades al comprimirse posteriormente, por ejemplo por la vibración.

Un desarrollo análogo ha seguido el de los métodos mejorados para obtener lo que ahora se denominan corrientemente muestras del "tubo Shelby", obtenidas forzando un tubo de acero de paredes delgadas a penetrar en el terreno, sin la ayuda de agua a presión; se puede separar la parte inferior de este tubo de acero para retirar la m-uestra . El muestreo de suelo en esta forma, se ha convertido en la actualidad en la práctica aceptada en la mecánica de suelos. Si se registra cuidadosamente lamedida de la fuerza necesaria para penetrar los sucesivos estratos del suelo, constituye, conjuntamente con las muestras, una indicación de las propiedades.

SONDEOS CON EQUIPO PARA OBTENER NUCLEOS

Cuando se alcanza la superficie de la roca, bien con calicatas o con los métodos de perforación ya descritos, es preciso cambiar de método si se desea penetrar en ella. En el caso general, sólo se trata de averiguar su naturaleza y de asegurarse que es la roca firme y no un canto suelto.

Con tal fin pueden emplearse varios métodos, pero aquí nos referiremos solamente al sondeo rotatorio, con el que se obtiene un núcleo central

cilíndrico, que se rompe periodicamente por su parte inferior y que se extrae para su examen. Para ésto se emplea una sonda rotatoria provista de una corona de diamantes, granalla o rodillos reemplazables de dientes de acero. La elección del equipo depende, hasta cierto punto, de la naturaleza de la roca; el tamaño del agujero, de la herramienta que se disponga y de la profundidad que se desea alcanzar. El sondeo de testigo continuo es operación delicada, que necesita personal experto y una cuidadosa vigilancia. El sondeo por percusión es otro medio de perforar la roca, pero no se usa mucho en estas exploraciones.

En algunos tipos de rocas blandas o desintegrables, es difícil a veces obtener secciones completas de testigos, por lo que habrán de hacerse suposiciones acerca de la naturaleza exacta del material perforado, basándose en las observaciones y experiencia del operador. Como es natural, el porcetaje de recuperación de testigos varía con la naturaleza de la roca. Algunos valores medios típicos son: en cuarcita, 90 por 100; en granito, 85 ; en arenisca, 70; en caliza, 60; en arcilla pizarrosa, 50 y en pizarra, 40 por 100. Estas cifras han de considerarse sólo como guia de lo que puede esperarse.

En general, la extracción de testigos no afectará la roca que se perfora, y las coronas de diamante en especial dejan un agujero limpio y de paredes lisas. Por tanto, es posible utilizar esa clase de sondeos para otros propósitos. Cuando la roca ha de estar después sujeta a presiones hidráulicas (como en el caso de la cimentación de presas), los orificios de los sondeos pueden cerrarse e inyectarles agua a presión, para observar si -retiene el agua- o no. En los sondeos de diámetro relativamente grande (más de 0.10 m) puede examinarse

el aspecto de la roca en sus paredes con bastante claridad mediante un periscopio equipado con una luz eléctrica del espejo inclinado. Esta simple idea ha sido aprovechada con el empleo de cámaras fotográficas especiales, que pueden introducirse incluso en sondeos de pequeño diámetro y hasta la profundidad que se desee; estas cámaras impresionan el ángulo completo de 360°,

Se han hecho muchos adelantos en este campo en Europa, entre ellos el empleo de una cámara electrónica que, a travé sde los apropiados circuitos, proyecta directamente la imagen en una pantalla de televisión, dispuesta en la superficie. Este instrumento también trabaja en sondeos de 3' (7.6 cm) y da una imagen razonablemente clara en la pantalla de 21" x 7" (0.54 x 0.18 m)

Hasta ahora nos hemos referido únicamente a sondeos verticales, pues la mayoria lo son, en especial los necesarios para investigaciones de fondos marinos.

Pero es absolutamente indispensable que los sondeos sean verticales. Los ingenieros, en particular, deben recordar que puede adoptarse el ángulo que se desee, pues en algunas investigaciones, es necesario hacer sondeos inclinados, horizontales o incluso ascendentes.

Una novedad cuando se empleo por primera vez, pero que ahora forma parte normal de la técnica de exploración, es la perforación con sondas rotatorias, de pozos de diámetro suficiente para quepueda introducirse un hombre.

El método de perforación y extracción de testigos es análogo al de los sondeos más estrechos, pero a veces es dificil romper el testigo y son necesarias cuñas especiales o el empleo de explosivos. Estos sondeos son practicables, solamente cuando una bomba pequeña pueda extraer el agua que penetre en ellos; además, han de tomarse siempre las precauciones necesarias para asegurar la renovación de aire fresco en el fondo de la perforación, especialmente cuando se emplean explosivos para romper los testigos.

Llegados los sondeos a la profundidad que se desea y una vez limpios, los geólogos e ingenieros descienden al fondo mediante aparejos, apropiados, y, con ayuda de lámparas portátiles, pueden examinar la roca in situ, ver los limites entre capas, estudiar de cerca las fisuras y hacer una exploración; completa, convenientemente y segura. Si se hacen las perforaciones después de haber cementado las capas en que se asentarán los cimientos de las obras, puede comprobarse la eficacia de la operación, lo que es muy importante, dada la incertidumbre que siempre existe acerca de la penetración del cemento. El coste de estos anchos sondeos es siempre grande, pero se compensa con las ventajas que ofrecen para la investigación del subsuelo.

El uso de estos sondeos de gran diámetro parece haberse desarrollado inicialmente en América del Norte, aunque también se hayan empleado con buen éxito en otros países.

VII-B. - EXPLORACION GEOFISICA, METODOS GEOSISMICOS Y GEOELECTRICOS

Los métodos geofisicos constituyen otro método para determinar las condiciones del subsuelo en una determinada región y pueden ser un útil y económico complemento al programa de exploraciones.

Ante todo, debemos advertir que los métodos geofísicos, constituyen solamente uno de tantos auxiliares de la investigación geológica y que, aplicados a la ingenieria, no deben mirarse nunca más que en ese concepto. No nos descubrirán más que lo que haria una buena serie de sondeos y, por lo general, no tanto; nunca deben emplearse sin una particular y constante correlación con la información geológica que se posea. De hecho, es indispensable un

estudio geológico antes de utilizar los referidos métodos con ciertas probabilidades de buen éxito, ya que, para que su interpretación sea provechosa, deben conocerse ciertas condiciones generales de la geologia local La condicion más favorable se da cuando la roca se encuentra bajo una cubierta somera de depositos superficiales y los caracteres fisicos de los dos son marcadamente distintos.

Además de los resultados practicos que a una exploración puede aportar la geofisica, esta moderna ciencia ha contribuido a un mejor conocimiento de nuestro planeta, por ejemplo, se ha determinado que la edad más probable de la tierra es de 4500 x 10^6 años, que la densidad media de la tierra es de 5.5 gr/cm^3, sólo 2.8 gr/cm^3. También mediante estudios geofisicos se han podido investigar.

Las temperaturas internas de la tierra. Uno de los cálculos más recientes sugiere que la temperatura en su centro es de unos 5000°C y la presión 3.5 x 16^6 atmósferas. Es posible medir directamente el balance término en la superficie de la Tierra, aunque no sea fácil. Tales medidas indican que en el flujo de calor observado nada más que el 20 por 100 puede proceder del calor original, por lo que la mayor parte tiene otros origenes, principalmente radiactivos.

Métodos geosísmicos

a).- El hecho de que las vibraciones producidas por terremotos, reales o artificiales, no se propagan a la misma velocidad en diferentes medios, permite descubrir los cambios que esos medios presentan. Aunque esta idea fue sugerida hace tiempo y se realizaron después experimentos en tal sentido, hasta principios del siglo actual no se construyeron instrumentos capaces de medir y registrar las vibraciones que alcanzan el punto de observación. Desde entonces se han me-

jorado los instrumentos originales y se han inventado otros, de modo que hoy los métodos sismicos de exploración subterránea, son ampliamente usados.

Los terremotos artificiales se provocan empleando poderosos explosivos, entre los cuales los más indicados son las dinamitas gelatinosas de alto poder explosivo para obtener mejores resultados, es preciso que las cargas estén bien retacadas. Las ondas asi producidas en el terreno (ondas elásticas terrestres, como algunas veces se las llama), son de dos tipos, causadas, respectivamente por vibraciones longitudinales y por transversales.

Tanto uno como otro tipo de ondas se transmiten a través de las distintas clases de rocas a diferentes velocidades y son refractadas cuando pasan de un medio a otro. Esta circunstancia constituye la base de los métodos sísmicos de investigación, en los que se registran las vibraciones observadas a diferentes distancias del lugar de la explosión, y los resultados asi obtenidos, se relacionan con los hechos conocidos acerca de la propagación de ondas en los distintos medios.

Los modernos sismógrafos son unidades compactas que pueden tener de uno a 12 canales de entrada para otros tantos sismodetectores (geofonos), los cuales se conectan a un cable general que envia las señales hasta el sismografo (ver fig. #66). El sismógrafo incluye además, un amplificador transistorizado para cada canal, el mecanismo de disparo (explosor) y una cámara Polaroid o cinta de papel sensible con los que se imprimen el momento del disparo y la llegada de la señal a cada geofono.

Durante la operación de campo en los trabajos de refracción -

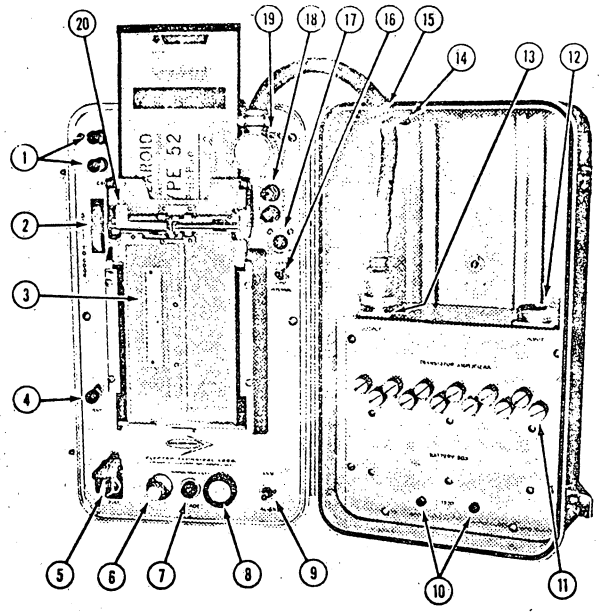


Figura 66
SISMOGRAFO DE REFRACCION
(Modelo ER-75-12)

1.- Terminales para el explosivo.
2.- Péndulo.
3.- Cámara.
4.- Terminal de tierra.
5.- Disparador.
6.- Control de voltaje para los galvanómetros.
7.- Lámpara indicadora.
8.- Voltmetro.
9.- Control de disparo.
10.- Probador de las baterías de los amplificadores.
11.- Controles de ganancia de los amplificadores.
12.- Entrada del cable.
13.- Salida del cable al aparato.
14.- Llave para ajustar los galvanómetros.
15.- Cable.
16.- Control interno y externo del aparato.
17.- Conexión para el cable de energía o para operar el equipo con martillo.
18.- Terminales para cargar las baterías.
19.- Entrada del cable de los amplificadores.
20.- Palanca para el proceso de la película.

aplicados a la ingeniería civil, se excava un pozo de poca profundidad (de 0.50 m a 1.00 m) en el que se coloca una carga de explosivos, los cuales se hacen detonar, generando la explosión un frente de ondas sísmicas . (Punto final de la fig. 67). Cuando este frente de ondas llegue a los puntos D_1, D_2... D_{12}, en donde se sembraron los geófonos, los perturba y captan el momento de la llegada de la onda.

Cada geófono consta de una bobina montada en resortes sumamente sensibles. Al llegar la onda, la bobina vibra moditicando la corriente que circulaba antes por ella. Esta variación de corrientes es enviada a través de los cables hasta el sismógrafo que la transforma en señal luminosa.

La señal luminosa se registra por medio de una cámara Polaroid o papel sensible o se anota por el operador, si el equipo es de un solo geófono. La fotografía o el papel sensible, tienen generalmente capacidad para captar señales de ~~sondos~~ doce geófonos. (fig. #68).

Previamente al disparo se deberán medir las distancias desde el punto de tiro hasta cada geófono y en algunos casos las elevaciones de todos estos puntos.

La explosión genera frentes de ondas concéntricas entre las que destacan las ondas longitudinales o de compresión, y las transversales o de cortante o de superficie; de éstas, las longitudinales son las mas rápidas y de menor disipación y dado que el geófono capta solo la llegada de la primera onda, resultan las únicas registradas claramente en el sismógrafo (fig. #68). Por tanto en lo sucesivo al hablar de velocidad de propagación, nos referimos solo a las ondas longitudinales.

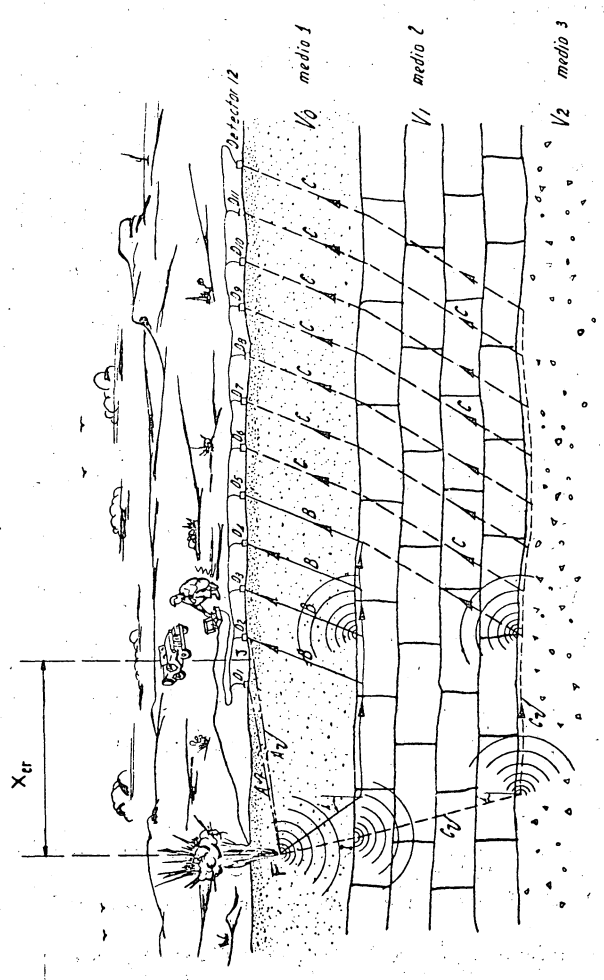


Figura 67

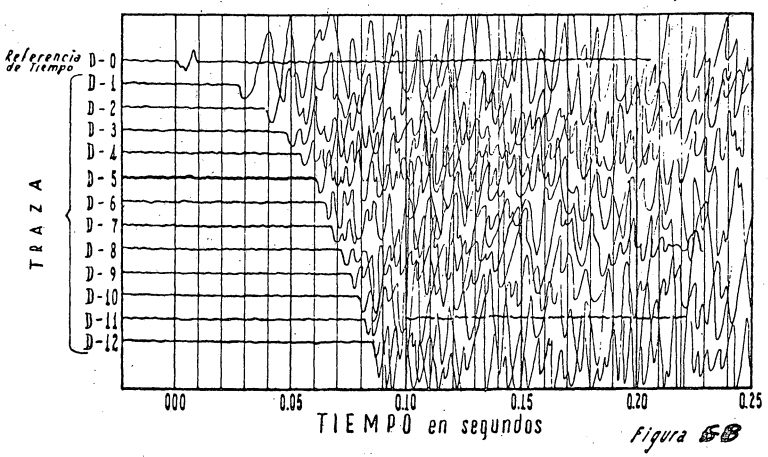


Figura 68

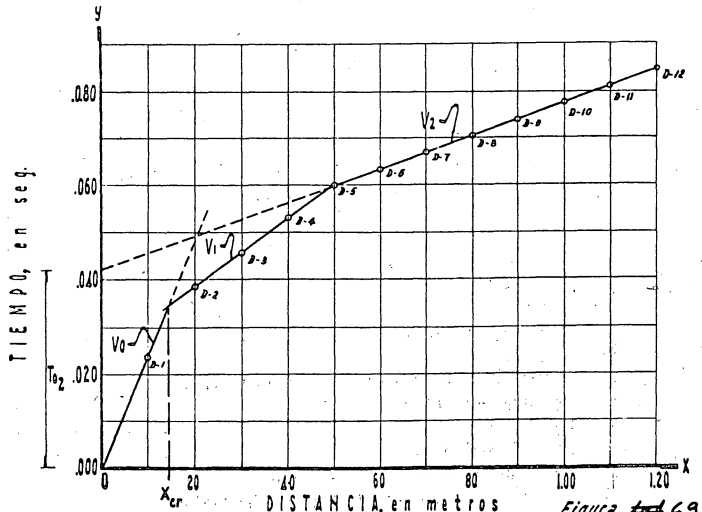


Figura 69

1.- Propagación de las ondas longitudinales.- Las ondas generadas por la explosión, cumplen con las leyes de la óptica, por tanto se propagan en línea recta y verifican las leyes de refracción y reflexión. Pero para fines de ingeniería civil, el único método empleado, es el de refracción sísmica.

Una onda originada en el punto F (fig.), se propaga en línea recta con velocidad Vo hasta alcanzar el medio de velocidad V_1. En la frontera este rayo se refracta siguiendo la ley de Snell:

$$\frac{\text{Sen } i_1}{\text{Sen } i_o} = \frac{V_1}{V_o}$$

donde:

i_o = ángulo de incidencia del rayo con respecto al contacto entre los dos medios

i_1 = ángulo de refracción del rayo

Vo y V_1 = Velocidades de propagación de las ondas en los medios 1 y 2

Cuando el rayo llega a la frontera entre los dos medios, con un ángulo de incidencia i_o tal que:

$$\text{Sen } i_o = \frac{V_o}{V_i}$$

se produce la refracción total de la onda con $i_1 = 90^o$

Supongamos que en el sismograma sólo aparece el tiempo de llegada de la primera onda longitudinal; ~~al geófono~~ se pueden presentar dos casos.

- El tiempo de llegada de la onda A, es menor que el de la onda B y por tanto el geófono registra la llegada de la onda A
- El tiempo de llegada de la onda B, es menor que el de la A y el feófono registra la llegada de

la onda refractada B.

La fig. #69), es la gráfica distancia al punto de tiro- tiempo de llegada de la onda a cada geófono, o sea la gráfica de velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinales.

En la figura se puede observar que existe un punto de quiebre, cuya distancia al foco de explosión es Xcr, que corresponde al punto en que las ondas A y B llegan simultaneamente, de modo que los geófonos localizados antes de ese punto, localizan la onda A y el resto la B o la C, cuando exista una tercera capa.

2.- Cálculo e interpretación.- Conociendo los tiempos de llegada de la señal a cada geófono y obtenida la gráfica de velocidades (será la recíproca de las pendientes) en los diferentes medios, se calcula la profundidad de los contactos en los diferentes medios, mediante ecuaciones, que varían según la disposición de las capas y el terreno. Daremos solamente las fórmulas para el caso más común, que es el que se ilustra en la fig. #69), o sea dos capas paralelas entre sí y con la superficie del terreno:

$$Zo = \frac{Xcr}{2}\sqrt{\frac{V_1 - V_o}{V_i + V_o}} + \frac{h}{2}$$

donde:

Zo = Espesor del estrato de velocidad Vo

Xcr = Distancia desde el punto de tiro al punto de cambio de velocidad, sobre el eje de abcisas.

Vo = Velocidad del medio 1

V_1 = Velocidad del medio 2

h = Profundidad del disparo

Para dos capas

$$Z_1 = \frac{1}{2}\left[T_{o2} - (2\,Z_o - h)\sqrt{\frac{V_2^2 - V_o^2}{V_o\ V_2}}\right]\frac{V_1\ V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

donde:

Z_1 = espesor del estrato de velocidad V_1

t_{o2} = tiempo medido en el eje de ordenadas, de la intersección de la pendiente de velocidad V_2, con dicho eje (fig. 4)

V_2 = Velocidad del medio 3

En forma semejante para una tercera capa, su espesor sería:

$$Z_2 = \frac{1}{2}\left[t_{o3} - \frac{(2Z_o - h)}{V_o\ V_3}\sqrt{V_3^2 - V_o^2} - \frac{2\,Z_1}{V_1\ V_3}\sqrt{V_3^2 - V_1^2}\right]\frac{V_2\ V_3}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

Todas las fórmulas de refracción sísmica son válidas siempre y cuando la velocidad de propagación aumente a profundidades; o sea si:

$$V_o \quad V_1 \quad V_2 \quad V_3$$

y en caso contrario no podrán ser aplicadas más que hasta la profundidad donde se cumpla esta condición. Así en la fig. #) se podrán obtener los espesores Z_o, Z_1 y Z_2, mientras que en la fig #) sólo se podrá establecer el espesor Z_o.

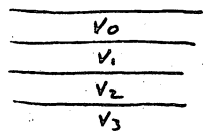


Fig .- $V_o < V_1 < V_2 < V_3$

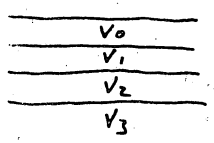
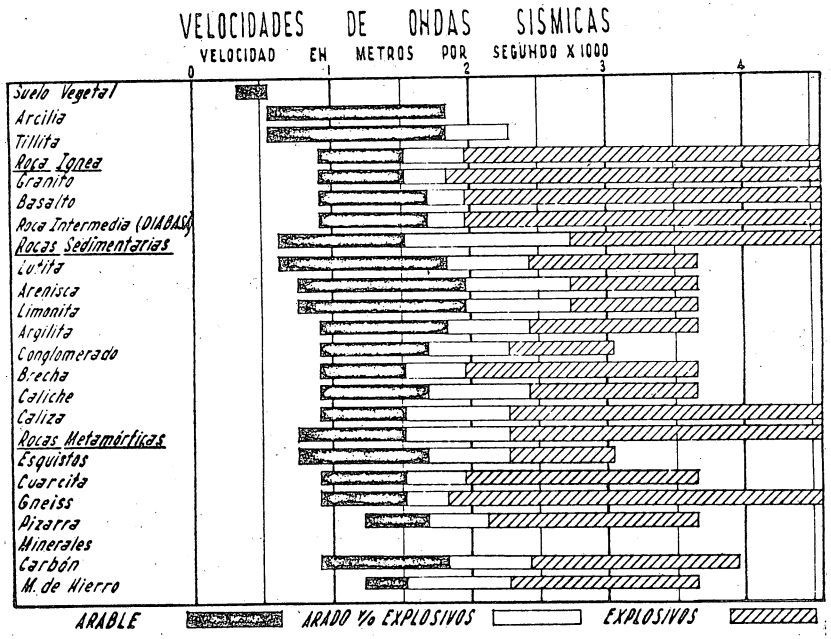


Fig .- $V_o < V_1 > V_2 < V_3$

3.- Aplicaciones a la Ingeniería Civil.- Son muy numerosas, destacando por su importancia, los estudios sísmicos en presas, caminos, exploraciones para túneles, cimentaciones, aeropuertos, puentes, estudios de bancos de préstamo, localización de cavernas etc., y la técnica empleada variavá, según los



Nota.- Tomadas del Handbook of Ripping - Caterpillar Tractor Co.

Fig. 70

Ataca bilidad de distintas rocas en función de la velocidad de propagación de ondas sísmicas refractadas (Tractor Caterpillar D-8).

fines que se persigan si bien las bases son las mismas.

b). - Métodos Geoeléctricos. - Al hablar del flujo de una corriente eléctrica a través de un conductor, nos podemos referir a la facilidad relativa cómo se produce el flujo de energía considerándola como el resultado de la conductividad relativa del material, o podemos referirnos al grado de resistencia ofrecido por dicho material, al paso de la corriente considerándola como la resistividad del material. Un ohmio es la resistencia que encuentra, o con que fluye, una corriente del 1 voltio cuya intensidad es de 1 amperio. La resistividad específica de una substancia, es la resistencia opuesta por un cubo de dicha substancia de 1 cm de arista. La resistividad específica se mide en ohmios-centímetros. La conductividad es recíproca de la resistividad.

Imaginemos un cuerpo limitado por un plano horizontal y de espesor infinito, y extensión lateral -también infinita, y supongamos que este cuerpo tiene conductividad eléctrica (o resistividad) uniforme. Consideremos dos puntos a y b, situados en la superficie horizontal, entre los cuales existe una diferencia de potencial, una corriente eléctrica fluye de a a b. De este modo la corriente que va de a hasta b se puede concebir como si corriera a lo largo de un número infinito de líneas curvas o líneas de flujo, que atraviesan el cuerpo entero. A lo largo de cada una de estas líneas exista una caída de potencial de a, a b; Todos los puntos del mismo potencial pertenecientes a las diversas líneas de flujo yacen en una superficie curva llamada -superficie equipotencial-. En un campo eléctrico cualquiera existe un infinito número de superficies equipotenciales. Una superficie equipotencial cualquiera es perpendicular a las líneas de flujo. En el interior de este cuerpo idealmente uniforme, el punto medio entre a y b es el centro de potencial.

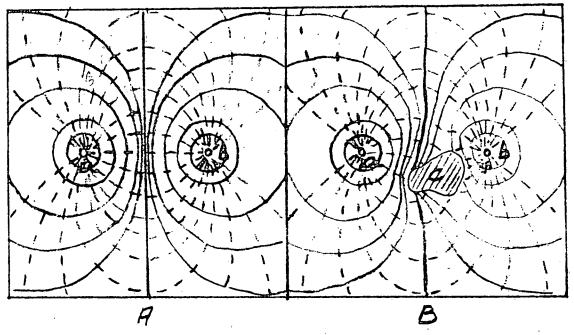


Fig. 71. A) Líneas de flujo de la corriente (interrumpida) y líneas equipotenciales (llenas) en un campo establecido por dos electrodos puntiformes en un medio de conductividad uniforme.
B) Un cuerpo de conductividad elevada ha deformado el campo.

En la litosfera no se realiza en parte la condición de conductividad (o resistividad) eléctrica uniforme. Las masas de rocas difieren mucho con respecto a esta propiedad. Las rocas secas son malas conductoras. El carbón y la sal, si están secos, son muy malos conductores, oponiendo elevada resistencia al paso de las corrientes eléctricas, a través de ellos. Sin embargo, en las condiciones naturales, las rocas se hallan más o menos húmedas, ya sea en su superficie externa, o en el interior en sus espacios porosos. El resultado es que la conductividad eléctrica de una roca depende de su contenido de agua intersticial (espacios porosos), y particularmente de la naturaleza y cantidad de sales solubles que hay disueltas en dicha agua, más bien que de las características minerales de la propia roca. El agua dulce esrelativamente resistente al paso de la energía eléctrica, mientras que el agua salada es un excelente conductor. Arcillas y pizarras arcillosas poseen espacios porosos demasiado pequeños para permitir la circulación y, a causa de ésto, contienen mayor o menor cantidad de agua salada originalmente nativa, por lo cual pueden ser mejores conductores que arenas y areniscas, en las cuales una mayor libertad de circulación ha diluído y endulzado el agua incluída. Sundberg ha establecido que -para fines prácticos... la resistencia específica de un agua natural está generalmente determinada por su contenido en cloros - . Se dá el cuadro siguiente de la resistividad apreciada en materiales de diversas rocas, según que sus espacios porosos estén llenos de agua dulce o casi dulce, o que estén llenos de agua salada.

RESISTENCIA ESPECIFICA EN OHMIOS POR CENTIMETRO CUBICO

ROCAS	POROS LLENOS DE AGUA SUPERFICIAL O PROFUNDA	POROS LLENOS DE AGUA SALADA
Caliza y arenisca .	100 000 - 1 000 000	500-4000
Arena y arcilla....	40 000 - 400 000	200 - 2200
Marga, loess.....	2 000 - 20 000	20 200

La resistencia específica del petróleo bruto es enormemente elevada, en contraste con la mayoría de los demás materiales del subsuelo en las formaciones sedimentarias. Se evalúa entre 10^{10} y 10^{16} ohm-cm.

A causa de la diversidad de condiciones en el interior de la litosfera, los efectos del calentamiento y del enfriamiento diarios de la superficie terrestre en su rotación, los efectos de las tormentas magnéticas y variaciones en el campo magnético terrestre, y otras causas, existen siempre diferencias locales y regionales de potencial en el interior de la Tierra. Estas diferencias de potencial original el flujo de la energía eléctrica desde los lugares de potencial más elevado a los de potencial más bajo. Estas corrientes naturales se llaman - corrientes subterráneas o corrientes telúricas-

Clasificación de los métodos de prospección eléctrica.- Los principales métodos practicados o ensayados en la prospección eléctrica, se pueden clasificar en dos grupos importantes:

1.- Métodos de self-potencial o electroquímicos, en los cuales se hace uso de las corrientes telúricas; y,

2.- Aquellos métodos que utilizan campos eléctricos de fuerza producidos artificialmente. Comprenden: a).- Métodos de resistividad, b).- Métodos de potencial superficial, c) Metodos de inducción o electromagnéticos, d),- Métodos de radiación, y e).- Método de corrientes transitorias.

En todos estos métodos, el principio básico implica la medida de la desviación de las propiedades eléctricas observada con respecto a valores o direcciones en las cuales estas propiedades se efectúan bajo condiciones ideales de conductividad uniforme.

Con referencia al segundo grupo de métodos, los cuales utilizan una corriente artificial, es de costumbre equilibrar cualesquiera corrientes telúricas que puedan existir antes de efectuar las lecturas relativas al campo artificial.

En algunos métodos de prospección eléctrica, el campo artificial se establece mediante contactos del terreno con motivo de los cuales pasa la corriente eléctrica. Esto se lleva a cabo por medio de electrodos, los cuales se conectan por encima del terreno por cables adecuados a una fuente que suministra la corriente y por debajo del suelo por la misma tierra, completándose de este modo el circuito.

Métodos que utilizan campos eléctricos de fuerzas artificialmente producidos.- Los más usados entre estos métodos y los únicos que trataremos, son los que consisten en la medida de la resistividad entre puntos previamente elegidos. Estos son los métodos de resistividad. A ellos pertenecen el método de Gish-Rooney, el de -Megger-, el de Jakosky y otros. Se clavan cuatro electrodos en el terreno a igual distancia entre sí y a lo largo de una línea recta. La distancia desde cada uno de los electrodos externos, C_1 y C_2, a los electrodos internos más próximos, y la distanciaentre los dos electrodos internos P_1 y P_2, puede llamarse D. Una corriente (continua o alterna) corre a través del suelo desde C_1 a C_2, siendo medida la diferencia de potencial entre P_1 y P_2, y calculada la resistencia entre P_1 y P_2, La experiencia muestra que, para fines -

fines prácticos, y a profundidades relativamente pequeñas, la resistividad de la tierra o del suelo se puede medir de este modo a una profundidad D. Por lo tanto, poniendo en marcha las observaciones a la distancia D (de C_1 a P_1 = de P_1 a P_2 = P_2 a C_2), relativamente pequeña, y aumentando sucesivamente D por etapas regulares es posible medir la resistencia de la tierra a profundidades cada vez mayores. En consecuencia, dibujando la curva de resistividad a la profundidad creciente, una discontinuidad o interrupción cualquiera que muestre la curva indicará la presencia de un cuerpo de resistividad, ya sea mayor o menor, como puede ser el caso. Efectuando lecturas de este género en una zona amplia, es evidente que un sistema de puntos de elevación puede asegurar la localización de tal cuerpo mediante el trazado de curvas de nivel. De esta manera, algunas veces es posible cartografiar la configuración subterránea de cauces fluviales enterrados, domos de sal a escasa profundidad, niveles de aguas subterráneas, fallas, etc.

c).- Utilidad de los métodos geofísicos en ingeniería.- Al hablar del método geosísmico de refracción enumeramos la utilidad que puede representar para el ingeniero, el método geoeléctrico tiene aplicaciones semejantes y resulta más económico tanto el equipo como su utilización, pero en camio su interpretación presenta mayor dificultad, no obstante esta dificultad resulta insustituible en la exploración de aguas subterráneas y en la diferenciación de aguas dulces y saladas.

No obstante cualquiera que sea el método empleado, se deberá recordar siempre que se trata de un método de prospección indirecto, por lo que deberá correlacionarse con buenos trabajos de geología superficial y perforaciones de exploración, cuando fuera necesario. Pero a pesar de lo cual si

los trabajos se planean y ejecutan correctamente 7 ú 8 veces mayor que si el trabajo se realizara a base de sondeos solamente.

VII.4. - Ilustraciones Geológicas

a). - Generalidades: Un mapa cualquiera que muestre la distribución de las rocas y la forma o distribución de las estructuras geológicas, es un mapa geológico. Un mapa geológico superficial, o mapa de formaciones, muestra la distribución de éstas. Un mapa estructural con curvas de nivel, muestra la distribución de éstas. Un mapa estructural con curvas de nivel, representa la característica de la estructura geológica por medio de curvas de nivel. La distribución de rocas sobre un mapa geológico se indica por diversas tramas o colores, y los rasgos lineales, tales como líneas de falla, líneas de contactos eruptivos, límites, etc., se muestran por líneas de diferentes clases y grosor. Si se hubieran de representar varias formaciones, se debe imprimir una abreviatura literal a intervalos en cada mancha de color. En el margen de un mapa geológico figura una leyenda, es decir, una clave relativa a los colores, tramas y líneas empleados en este mapa particular.

La trama o color a emplear en un mapa de formaciones geológicas depende, en buena parte, de la inclinación del investigador, a menos que él trabaje para alguna organización que haya adoptado ya un esquema determinado.

b). - Colores y símbolos en mapas geológicos. - Con objeto de ofrecer una mayor claridad al lector, los planos geológicos se elaboran utilizando diferentes colores o achures para diferenciar las diversas unidades de rocas, además de

una letra característica.

Respecto a los colores existe un criterio internacional comunmente adoptado. El Cuaternario, se presenta en distintos tonos de amarillo (Q)

El Terciario en tonos cafés (T)

El Cretácico en tonos verdes claros (K)

El jurásico en tonos de azul (J)

El Triásico en violeta o tonos grisáceos (Tr)

El Pérmico en café anaranjado (P)

El Carbonífero es Gris (Ca)

El Derónico en café parduzco (D)

El Silúrico en Verde Oliva medio (S)

El Ordovícico en verde medio (O)

El Cámbrico en verde azulado medio (C)

El Precambrico en Rosa (Pr)

Por lo que respecta a los achures, las formaciones sedimentarias depositadas en mares o lagos u otras masas de agua, permanentes, se emplean líneas paralelas.

Las formaciones aluviales, glaciares y cólicas se representan con puntos y círculos.

Las formaciones eruptivas se representan generalmente con triangulos, rombos o con tramas de "V"

Las rocas metamórficas se presentan con trazos cortos e irregulares a excepción de las pizarras que se señalan con líneas onduladas paralelas a los planos estructurales.

También se utilizan combinaciones de los símbolos anteriores.

A continuación se resume lo antes mencionado y los principales símbolos utilizados en los mapas y cortes por el U.S. Geological Survey:

Contacto indicando el buzamiento (con trazo interrumpido si la localización es aproximada.

Contacto indefinido

Contacto oculto

Signos convencionales empleados para rocas eruptivas y sedimentarias:

25 — Coladas; la línea recta indica el rumbo aproximado de la capa (N45°E) buzamiento.

40 — Si el buzamiento es mayor de 30°, la figura se rellena en negro.

30 30 — Rumbo y buzamiento de la estratificación (EW-30°N)

80 80 — Estratificación invertida. En el ejemplo la capa a dado una vuelta de 100°, es decir, ha llegado a 90° (vertical) y después ha girado otros 10°.

Estratos N 45°E, vertical

Estratros horizontales

Signos convencionales para estratos plegados.

Eje anticlinal mostrando el buzamiento del eje.

Eje sinclinal, mostrando el buzamiento del eje.

Anticlinal recostado mostrando la dirección de buzamiento de los flancos.

Sinclinal recostado mostrando la dirección de buzamiento de los flancos.

Signos convencionales para representar fracturas y diaclasas en mapas geológicos.

30° — Rumbo y buzamiento de diaclasas

Rumbo de diaclasas verticales

Diaclasas horizontales

Signos relativos a las fallas en los mapas:

60 60 60 — Fallas con indicación de su buzamiento, con linea interrumpida si la localización es aproximada. Las pueden suprimirse.

Falla oculta

? ? — Falla dudosa o probable

Indicación del desplazamiento horizontal de una falla, mostrando el desplazamiento relativo de los bloques.

Falla normal, las estrías indican el bloque hundido.

Falla inversa, los triángulos indican el bloque que ha subido.

Brecha de falla

Signos convencionales relativos a las fallas en los cortes o perfiles.

Fallas normal e inversa, las flechas indican el desplazamiento relativo, de los bloques fallados.

Signos convencionales para representar las distintas litologías; se emplean comunmente en perfiles geológicos pero si los planos no se colorean también pueden utilizarse en éstos.

Suelo vegetal

Arena

Arcilla

Grava

Limo

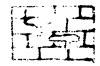
Aluvión

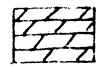

Lutita


Arenisca


Conglomerado

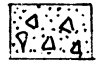

Caliza u otras rocas calcáreas


Caliza cárstica

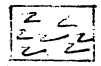

Dolomita


Rocas ígneas intrusivas


Rocas ígneas extrusivas


Rocas piroclásticas


Brechas


Rocas melamórficas (excepto pizarras).


Pizarras

Además de los símbolos geológicos propiamente dichos, un plano que se utilice en geología deberá tener necesariamente una base topográfica en la que apareceran los símbolos topográficos correspondientes.

Dado que en ninguna de las dos ciencias existe hasta el momento una simbología estandarizada universalmente, el plano geológico deberá incluir una leyenda donde aparezca la simbología empleada en forma bien detallada y clara.

CAPITULO VIII

Aguas Subterráneas.-

El origen de las aguas subterráneas es uno de los problemas que más han preocupado al hombre desde los tiempos más remotos. La teoría de la infiltración, que supone que todas las aguas subterráneas provienen bien de infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirecta de ríos o lagos, no ha sido aceptada universalmente sino desde tiempos relativamente recientes. Por un explicable error colectivo, que ha durado decenas de siglos, los pensadores de la antigüedad aceptaban como axiomático que las precipitaciones atmosféricas no eran suficientes para mantener los grandes caudales subterráneos que emergían espontáneamente o eran alumbrados por la mano del hombre en algunos puntos de la superficie terrestre.

La teoría de la infiltración es la única firme y universalmente aceptada modernamente. Ha sido satisfactoriamente demostrada comparando y analizando grandes series de datos de la penetración del agua de lluvia y de nieve a través del terreno, las pérdidas por infiltración en ríos y lagos, el aumento de nivel freático, como consecuencia de las lluvias y las corrientes de infiltración de los ríos, la pendiente de las superficies freáticas desde las zonas de infiltración a los puntos de afloración, la relación de la cantidad de agua extraída de un área determinada a la precipitación media anual y a la permeabilidad de los materiales del terreno, así como las variaciones de los afloramientos de aguas -

subterráneas en relación con las variaciones de las precipitaciones, así pues el abastecimiento de los acuíferos depende esencialmente del ciclo hidrológico que se ilustra en las Figuras

Infiltración directa de las precipitaciones.-

La carga de la zona de saturación debida a la aportación de las precipitaciones atmosféricas puede descomponerse en tres etapas, que son: 1) infiltración del agua desde la superficie al terreno que yace inmediatamente bajo ella; 2) movimiento descendente del agua a través de la zona de aireación; y 3) entrada del agua en la zona de saturación, donde pasa a formar parte de las propiamente llamadas aguas subterráneas. Evidentemente, una parte del agua que entra en la zona de aireación vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración vegetal, perdiéndose así su incorporación al almacén subterráneo de la zona de saturación.

La infiltración se produce, por la acción combinada de las fuerzas de gravedad y de atracción molecular. Cuando la humedad del suelo es reducida y una gota de agua de lluvia toca la superficie del terreno las fuerzas moleculares de éste la atraen y hacen que se absorba rápidamente. En este proceso el propio peso de la gota de agua tiene una importancia totalmente secundaria. Cuando la superficie del terreno va humedeciéndose más y más, el proceso de atracción molecular va perdiendo intensidad y la infiltración tiene lugar debido, cada vez más, a la atracción gravitatoria. Así como en la primera fase la permeabilidad del terreno era secundaria en comparación con el desequilibrio de humedad del suelo, en esta segunda es la permeabilidad la que fundamentalmente de-

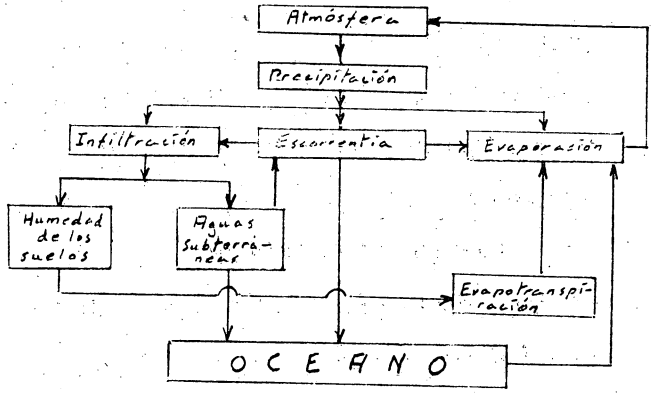


Fig. 72. Esquema del ciclo hidrológico

$$P = I + E + Ev$$

donde:

P = precipitación
I = infiltración
E = escorrentía
Ev = Evaporación

termina la velocidad de penetración del agua.

Cuando el suelo vegetal en un punto determinado está saturado, cualquier nueva adición de agua que reciba su superficie descenderá por gravedad desde el manto de evaporación, ya sea directamente a la zona de saturación o al manto intermedio de la zona de aireación. Puesto que este manto intermedio no está afectado apreciablemente ni por la evaporación superficial ni por la absorción de las raíces de las plantas, normalmente retiene toda el agua que puede contener por efecto de las fuerzas de atracción molecular. Sin embargo, la mayor parte del agua tiende a descender más aún obedeciendo a las fuerzas de gravedad.

Puesto que el subsuelo en muchos puntos es menos permeable que el propio suelo vegetal, es posible que en momentos de abundante infiltración se retarde la filtración descendente y se cree en el mismo suelo vegetal una zona de saturación superior temporal. Estas zonas de saturación someras y temporales se encuentran en muchos sitios durante épocas de lluvias prolongadas y fuertes o en la época del deshielo, especialmente a principios de primavera. Después van quedándose exhaustas, ya sea por filtración vertical o por infiltración hacia otras corrientes de agua e incluso, durante la estación de crecimiento vegetal, por efecto de la absorción de las raíces.

Infiltración de las corrientes superficiales.-

Las corrientes se clasifican en general en dos categorías: corrientes influentes y corrientes efluentes (Fig.74). En las primeras el nivel de las aguas superficiales está por encima de la superficie freática libre y el agua pasa desde -

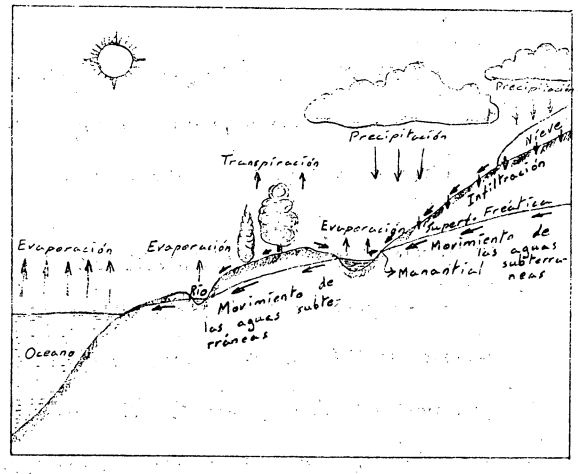


Fig.73 El ciclo hidrológico

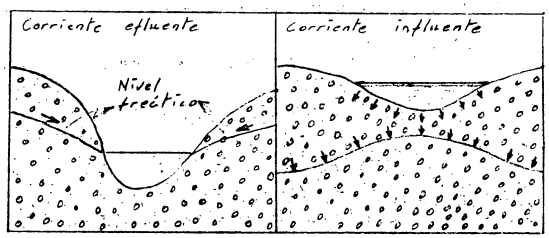


Fig. 74

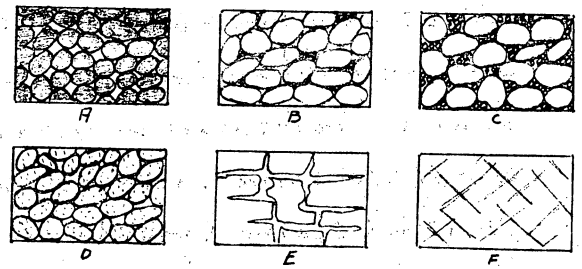


Fig.75. Representación esquemática de distintos tipos de porosidades
A- Granulometría homogénea (Gran porosidad).
B- Granulometría homogénea con cementación de los intersticios (menor porosidad).
C- Granulometría heterogénea (Baja porosidad).
D- Granulometría homogénea de elementos porosos (Muy alta porosidad).
E- Roca porosa por solución.
F- Roca porosa por fracturamiento.

la corriente superficial a la zona de saturación. Por el contrario, una corriente se llama efluente si su nivel está por debajo del nivel freático y, por lo tanto, recibe aportaciones de agua subterránea de los mantos de las laderas. En algunas regiones relativamente lluviosas, casi todas las corrientes de agua de flujo perenne o casi perenne son efluentes. En estas regiones la recarga tiene lugar en las zonas existentes entre dos ríos o arroyos, de manera que las corrientes sirven como canales de drenaje natural que descargan el exceso de caudal de los almacenes subterráneos de agua. La recarga tiene lugar principalmente por la penetración vertical de la lluvia y del agua de las nieves en la inmediata vecindad de su punto de precipitación. Sin embargo, cuando la intensidad de precipitación de lluvia o nieve es superior a la velocidad con que puede infiltrarse el agua a través de la superficie del terreno, este exceso de precipitación correrá sobre la superficie en la dirección de su máxima pendiente.

Condiciones determinantes de la recarga.-

Las condiciones que determinan la velocidad y caudal de la recarga de aguas subterráneas puede ser de dos categorías: aquellas relacionadas con la precipitación, como verdadera fuente de abastecimiento, y aquellas relacionadas con la facilidad de entrada del agua en el terreno, las cuales determinan la proporción de agua de lluvia o nieve que alcanza los depósitos subterráneos.

La precipitación varía grandemente en cantidad de unos sitios a otros y es también notablemente variable con el tiempo en cualquier sitio determinado. La recarga de agua subterránea varía mucho también de un sitio a otro y de

unas épocas a otras, no sólo porque las condiciones de entrada son también variables, sino también porque, incluso con las mismas condiciones de toma, la relación de la recarga a la precipitación varía grandemente con la cantidad y distribución de las precipitaciones y según tengan lugar como lluvia o como nieve.

En general, la proporción de precipitación que puede transformarse en aguas subterráneas aumenta con la precipitación, pero sólo hasta un cierto límite. Si las precipitaciones tienen lugar en forma de lluvias ligeras y dispersas pueden todas ellas ser absorbidas por el terreno. Las lluvias que tienen lugar después de que la falta de humedad del suelo ha sido satisfecha son precisamente las que tienen utilidad en la recarga del almacén de aguas subterráneas.

En las regiones semiáridas la recarga puede ser solamente un porcentaje muy pequeño de la precipitación y en grandes llanuras muy áridas la cantidad que constituye la recarga puede ser extraordinariamente pequeña o nula completamente.

La cantidad de recarga en cada área determinada depende grandemente de la distribución de la precipitación. Una cantidad dada de precipitación durante la época de crecimiento vegetal producirá la máxima recarga si tiene lugar en un período de lluvia persistente de intensidad tal que se infiltre con la misma rapidez que va cayendo. Si, por el contrario, cae distribuida en lluvias intermitentes a lo largo de un período de tiempo considerable, puede ser más beneficiosa para las cosechas, pero de esta agua muy poca o ninguna cantidad puede atravesar el terreno vegetal para llegar a la zona de saturación. Por otra parte, si la precipitación tiene lugar en forma de aguacero de gran intensidad y corta duración, solamente una pequeña parte puede infiltrarse en el suelo y todavía otra

menor puede alcanzar las zonas de saturación, ya que la mayor parte del agua - correrá en forma de escorrentía directa hacia corrientes superficiales.

En los climas fríos, durante el invierno, la capa superficial del terreno se hace impermeable a causa de las heladas y la recarga es prácticamente nula. Al empezar el deshielo, en primavera, es cuando la recarga superficial se hace sentir con mayor intensidad. Si el terreno superficial está helado y además cubierto con una capa de nieve que lo aísla térmicamente del ambiente, las posibilidades de recarga dependen mucho de las condiciones climatológicas de la zona durante la época del deshielo. Si la fusión de la nieve es muy rápida y tiene lugar -- principalmente antes de que el terreno se haya deshelado, el agua producida por ella se perderá para la recarga subterránea en forma de escorrentía superficial. - Si es lenta, es prácticamente simultánea con el deshielo del terreno y la infiltración y recarga serán entonces máximas.

Hay otras condiciones que afectan fundamentalmente la recarga. Una de ellas es el tipo de cultivo del terreno. Las zonas de bosque y los prados producen mejor recarga que las arables, incluso para el mismo tipo de terreno. En - las primeras el agua está más limpia y no tapona los intersticios de penetración. Por otra parte, las raíces muertas constituyen canales que tienden también a favorecer la recarga.

Otra característica evidentemente decisiva en la recarga subterránea es la topografía del terreno. En zonas con grandes pendientes, la escorrentía es máxima y, por tanto, la infiltración es mínima. Las grandes llanuras de materiales - sedimentarios permeables constituyen a este respecto las zonas de infiltración más eficaces.

La extensión de la cuenca receptora tiene también influencia decisiva en la cantidad de agua infiltrada en ella. La recarga aumentará si la cuenca directa de precipitación está aumentada con las aportaciones de corriente superficiales que recogen e infiltran las aguas recogidas en las montañas, en las cuales la intensidad de precipitación suele ser mayor.

A título de ejemplo, ya que no es posible establecer normas simplistas en el coeficiente de infiltración, que está sujeto, como hemos visto, a la influencia de factores muy diversos y complejos, insertamos a continuación una tabla de distribución del agua llovida, según Darder, en función de las condiciones del terreno.

TABLA No. 6

Distribución del agua llovida en los distintos terrenos

NATURALEZA DEL TERRENO	Evaporación %	Escorrentía %	Infiltración %
1.- Terreno arcilloso horizontal, sin intercalaciones de bancos permeables.....	75	22	3
2.- Terreno arcilloso silíceo con algo de caliza (tierra de labor) horizontal.....	50	5	45
3.- El mismo caso 1, pero con pendiente - del terreno.....	53	45	2
4.- El mismo caso 2, pero con pendiente - del terreno.....	45	20	35
5.- Terrenos a base de areniscas compactas y poco fisuradas.....	50	20	30
6.- Terrenos de areniscas deleznables con - fisuras.....	35	5	60
7.- Terrenos calizos horizontales y poco fisurados.....	65	15	20
8.- Terrenos calizos horizontales pero muy - fisurados.....	45	5	50
9.- Terrenos dolomíticos triturados (gravas - miloníticas).....	20	0	80

NATURALEZA DEL TERRENO	Evaporación %	Escorrentía %	Infiltración %
10.- Terrenos calizos fisurados y en pendiente pronunciada.....	25	5	70
11.- Terrenos graníticos y gneísicos, no descompuestos en su superficie.....	60	30	10
12.- Terrenos graníticos descompuestos en su superficie, pero sin zona semidescompuesta.....	50	15	35
13.- Terrenos graníticos, descompuestos en su superficie y con zona inferior semidescompuesta.....	20	5	75
14.- Terrenos pizarrosos no descompuestos...	50	25	25
15.- Terrenos pizarrosos descompuestos o con predominio de pizarras arcillosas	50	40	10
16.- Cuarcitas agrietadas o pizarras muy duras, también agrietadas.	40	5	56
17.- Rocas volcánicas con oquedades o calizas (molasas) muy detríticas y poco compactas.....	30	0	70
18.- Aluviones dominando el cascajo en la superficie del terreno y con poca arcilla.....	37	5	65

La intensidad de la recarga debida a las corrientes superficiales influentes depende grandemente del estado del lecho de las corrientes. Aunque el terreno por el que transcurre un río sea muy permeable, la infiltración puede ser reducida, a causa de que el lecho se haya impermeabilizado por arrastres de limos arcillosos o por deposiciones calizas que cementen los materiales del fondo. Cuando el río está sujeto a crecidas fuertes, éstas suelen lavar los depósitos impermeables y aumentar la capacidad de infiltración del lecho del río. Los embalses de regulación tienden a anular este efecto beneficioso de lavado, al suprimir las grandes avenidas. Por otra parte, los embalses son favorables a la infiltración en cuanto decantan el agua de elementos arcillosos finos, de modo que las deposiciones

impermeables limosas aguas abajo pueden ser más reducidas.

Recarga artificial.-

La idea de recargar artificialmente la zona de saturación ha sido llevada a la práctica con gran éxito en los últimos años. El objeto de la recarga artificial es bien obtener un agua limpia y filtrada, mediante pozos en el acuífero recargado con aguas sucias o contaminadas, o bien emplear los acuíferos como embalses reguladores que cubran la demanda durante todo el año, aunque la recarga sólo puede efectuarse durante las épocas de abundancia de agua. La recarga puede hacerse superficialmente, mediante grandes balsas de poca profundidad, cuyo fondo está en contacto con el terreno permeable, o mediante pozos de recarga que introducen el agua en los acuíferos. En este sentido se han usado con gran éxito los pozos Ranney de colectores horizontales radiales, tanto para la recarga del acuífero como para su extracción en otro punto.

La utilización del sistema de recarga artificial de los acuíferos en unos puntos y su aprovechamiento mediante captaciones en otros permite, en muchos casos, situar adecuadamente los pozos de toma en relación con la instalación a abastecer, reduciendo así los costos de tuberías de transporte del agua, líneas eléctricas, etc. En definitiva, los acuíferos subterráneos actúan en estos casos como elementos no sólo de almacenaje, sino también de transporte subterráneo del agua, con las consiguientes economías de instalación y explotación.

Intersticios del terreno.-

Puesto que el agua subterránea es conducida y contenida por los intersti--

cios que presentan las formaciones del terreno, la forma y características de estos intersticios influyen de un modo fundamental en el comportamiento de aquélla.

Las variaciones de forma, volumen y orientación de los intersticios del terreno son tan grandes que modifican por completo el carácter del movimiento de las aguas en su interior. Desde las grandes cavernas en terrenos calizos o volcánicos, hasta las cavidades microscópicas de las arcillas compactas hay toda una infinita variedad de condiciones, que consecuentemente influyen en el comportamiento de sus aguas subterráneas.

La figura 75 indica varios tipos característicos de intersticios, según el carácter de las formaciones geológicas en que tienen lugar.

Los intersticios de los terrenos se clasifican en dos grandes grupos: los de origen, engendrados al mismo tiempo que se formaron las rocas que los contienen, y los secundarios, tales como diaclasas, fisuras de meteorización o conductos formados por disolución, cuyo origen es posterior e independiente del de las rocas que los contienen. Por su mayor regularidad y su gran importancia desde el punto de vista de su utilización, los intersticios de los terrenos granulares sedimentarios (gravas y arenas) han sido los mejor estudiados hasta hoy y los que recibirán atención casi exclusiva en todo lo que sigue.

Porosidad.-

La porosidad de un terreno se define como la relación del volumen de huecos al volumen total de terreno que los contiene. La porosidad depende de un gran número de factores, tales como naturaleza fisicoquímica del terreno, granulometría de sus componentes, grado de cementación o compactación de los mismos,

efectos de disolución, de meteorización, fisuración, etc.

Se dice que un terreno está saturado cuando el volumen de su huecos está totalmente lleno de agua. En este caso la porosidad coincidirá prácticamente con el tanto por ciento del volumen de agua que contiene el terreno.

La porosidad de un terreno puede variar entre márgenes muy amplios, de 80 a 90 por 100 en sustancias floculentas, como las de los depósitos recientes en los deltas, hasta menos de 1 por 100 en las rocas compactas. Se supone que, a grandes profundidades, en rocas compactas la porosidad es prácticamente cero.

En depósitos de materiales sueltos, que, como decimos, son los que constituyen la fuente más importante de aguas subterráneas, las porosidades pueden oscilar de un 5 a un 40 por 100. La porosidad se considera pequeña si es menor del 5 por 100; entre el 5 y el 20 por 100, media, y grande si se eleva por encima del 20 por 100.

Composición granulométrica.-

La determinación de la composición granulométrica de un terreno se hace normalmente clasificando sus partículas por tamaños y determinando el porcentaje en peso que representa cada tamaño. Esta separación suele hacerse generalmente por medio de tamices, hasta tamaños superiores a los 0,006 mm, a partir de los cuales es indispensable recurrir a otros procedimientos basados en la ley de Stokes, que relaciona el diámetro de una partícula con su velocidad de caída en un líquido o de arrastre por una corriente gaseosa.

Los resultados de los análisis granulométricos de un terreno suelen expresarse mediante su curva granulométrica acumulativa, que relaciona el tamaño de las partículas con los porcentajes en peso de tamaños menores del considerado.

La figura 76 representa, según O. E. Meinzer, la curva granulométrica acumulativa de varios materiales tipo.

La denominación de los materiales según sus tamaños está sujeta a distintas clasificaciones, variables según los criterios de distintos autores u organismos. La adoptada por el Ministro de Agricultura de los Estados Unidos es la siguiente, con indicaciones de los diámetros en milímetros.

Arena muy gruesa, 2 a 1.

Arena gruesa, 1 a 0,5.

Arena media, 0,5 a 0,25.

Arena fina, 0,25 a 0,1.

Arena muy fina, 0,1 a 0,05.

Limo, 0,05 a 0,005.

Arcilla, menos de 0,005.

Desde el punto de vista que interesa fundamentalmente al ingeniero, que es la facilidad de movimiento del agua subterránea en el terreno, no tiene tanta importancia el diámetro medio de las partículas como su distribución en su seno. Es decir, una arena fina de tamaño homogéneo puede ser más permeable al paso del agua que una mezcla de grava gruesa con arena fina y algo de limo, por ejemplo, con granulometría tal que el volumen y tamaño de los intersticios sea muy reducido. Es, por tanto, muy interesante el estudio de la curva granulométrica de un terreno en relación con la determinación de su permeabilidad, e incluso hay multitud de fórmulas que tratan de establecer una correspondencia exclusiva entre ambos conceptos.

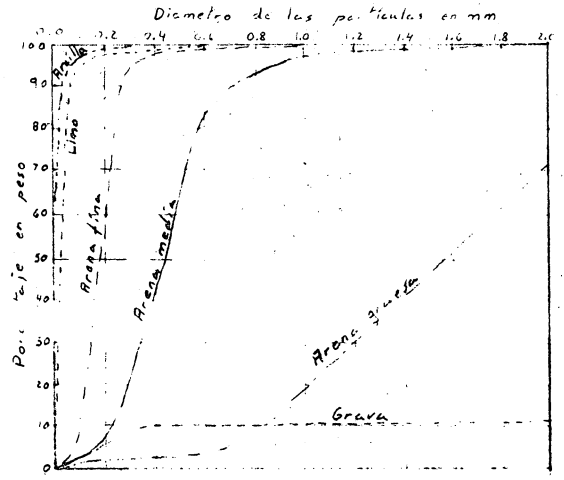


Fig. 76. Curva granulométrica acumulativa de materiales de distintos tipos.

Fuerzas actuantes sobre las aguas subterráneas.-

Los dos tipos de fuerzas que principalmente determinan los movimientos de las aguas subterráneas son, como hemos visto, las de gravedad y las de atracción molecular o capilaridad.

Las fuerzas de gravedad cuyos efectos sobre el movimiento de los líquidos son bien conocidos, son las que producen la entrada de las aguas superficiales en el terreno, su movimiento descendente en su seno y su afloración a la superficie, en forma de manantiales, fuentes, pozos artesianos o lagunas. Es también la gravedad la que impulsa a las aguas a correr hacia un pozo, desde el momento en que un descenso producido por el bombeo crea el necesario gradiente para que las aguas "caigan" hacia él.

El segundo tipo de fuerzas, las de capilaridad o atracción molecular no ha recibido la atención que merece su importancia. Son éstas las atracciones que ejerce la superficie de las partículas del terreno sobre las moléculas de agua, y las que ejercen estas últimas entre sí. La atracción superficial de un trozo de roca está burdamente ilustrada por la película de agua que lo cubre al sacarlo del agua. No obstante la ínfima cantidad de agua adherida en este caso, puede imaginarse que en un volumen de arena fina, en que la superficie de las partículas es enorme, las fuerzas moleculares son realmente las predominantes y las que definen el comportamiento del agua en su interior

Para ilustrar este punto, Meinzer cita el experimento sencillísimo de tomar una muestra de arena en una formación conocida por sus abundantes pozos y ponerla en un tubo de ensayo, añadiendo a continuación agua hasta su saturación. Volcando el tubo, puede verse que es imposible, en algunos casos, extraer ni una sola gota del agua de la muestra.

Porosidad eficaz.-

La cantidad total de agua almacenada en un suelo permeable es el producto del volumen de suelo saturado por su porosidad. Sin embargo, si tratamos de drenar por gravedad este terreno permeable, se observa que el volumen de agua que puede extraerse es muy inferior al del total de agua almacenada en la formación. El resto queda retenido en la formación en forma de películas líquidas adheridas por atracción molecular a las partículas del terreno. Esta agua remanente no es aprovechable, pues, mediante una captación subterránea; ocupa un espacio del almacén disponible, pero no puede extraerse de él para su utilización.

De aquí la importancia que, para el cálculo de una captación que trabaje en embalse subterráneo, tiene la determinación de los volúmenes aprovechables y retenidos.

La relación del volumen de agua drenable por gravedad de un terreno al volumen total de éste se llama porosidad eficaz. La cantidad de agua retenida por el material contra las fuerzas de gravedad, dividida por el volumen total de terreno, se llama retención específica. Evidentemente, la suma de ambos valores en un terreno saturado da la porosidad total, tal como la hemos definido anteriormente.

Se comprende que en materiales con intersticios grandes (gravas gruesas homogéneas o calizas cavernosas) la porosidad eficaz tendrá un valor muy próximo a la porosidad total. Por el contrario, en materiales finamente divididos,

como arenas muy finas o arcillas, la porosidad eficaz puede ser muy pequeña, incluso aunque la total sea del mismo orden que en los ejemplos de materiales de grandes huecos citados anteriormente. Puesto que la retención específica depende de los fenómenos de atracción superficial, en aquellos materiales en que por ser de grano fino presentan una superficie específica mayor, la retención será proporcionalmente más grande. En materiales muy finos, como arcillas o limos, que pueden tener una porosidad total grande, la retención específica es tal, que alcanza el valor de la total y los terrenos formados con ellos, aun estando saturados, no son en absoluto utilizables en el aprovechamiento de sus aguas subterráneas.

Las determinaciones en el laboratorio tanto de la porosidad eficaz como de la retención específica tienen una serie de limitaciones, relacionadas con la pequeñez obligada de las muestras, su perturbación, la dificultad de que sean representativas de terrenos de gran extensión, etc., que las hace poco útiles desde un punto de vista práctico.

Permeabilidad.-

La capacidad de un terreno de permitir el paso del agua a su través se llama coeficiente de permeabilidad o, abreviadamente, permeabilidad. Se define como el caudal de agua que se filtra a través de una sección de área de terreno unidad bajo la carga producida por un gradiente hidráulico unitario, estando el agua a una temperatura fija determinada (Fig 78). El hecho de fijar la temperatura, que muchos autores pasan por alto, tiene una gran importancia práctica, ya que las diferencias de viscosidad del agua influyen fundamentalmente en el cálcu

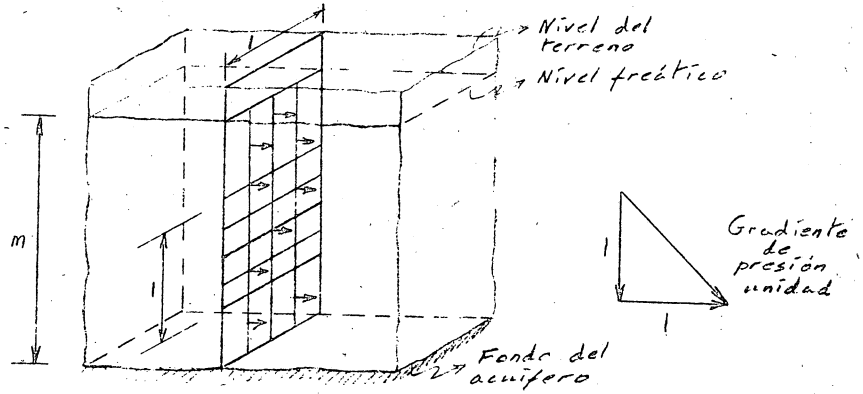


Fig. 77. Esquema ilustrativo de las definiciones de permeabilidad y transmisibilidad

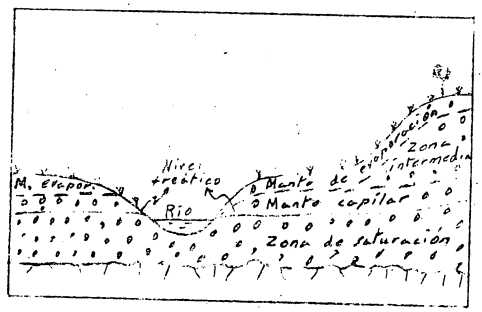


Fig. 78. Zonificación del terreno según el comportamiento de las aguas subterráneas

lo de una captación.

La permeabilidad de un terreno es el factor más importante del mismo en relación con la explotación de sus aguas subterráneas. Varía con el diámetro y la granulometría de las partículas que lo forman. También depende de la naturaleza y rugosidad de estas partículas. En la mayor parte de los casos es una propiedad fundamentalmente anisótropa, con dirección dependiente del origen geológico del terreno estudiado.

Transmisibilidad.-

El concepto de coeficiente de transmisibilidad o simplemente transmisibilidad, que fue introducido por Theis en 1935, está siendo cada vez más usado en la técnica moderna de exploración de aguas subterráneas. Se define como el caudal que se filtra a través de una fja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado, bajo un gradiente hidráulico unidad, a una temperatura fija determinada (Fig 76).

La figura ilustra la significación de los conceptos de permeabilidad y transmisibilidad. La primera se refiere al caudal que pasa a través del área cuadriculada, la segunda a través del área rayada. Si es m el espesor saturado de la formación permeable, la transmisibilidad es igual al producto de la permeabilidad por dicho espesor.

El agua en las zonas del subsuelo.-

Se han clasificado las distintas zonas de la corteza terrestre, según se indica en la figura 78 , de acuerdo con el comportamiento del agua que contienen.

En la zona plástica, es decir, en aquellas profundidades en que las rocas están sometidas a presiones tales que sufren deformaciones plásticas, los intersticios probablemente desaparecen y el único agua que la roca contiene es el agua de composición, que se sale, por tanto, del campo de la hidrología, para entrar en el de la química.

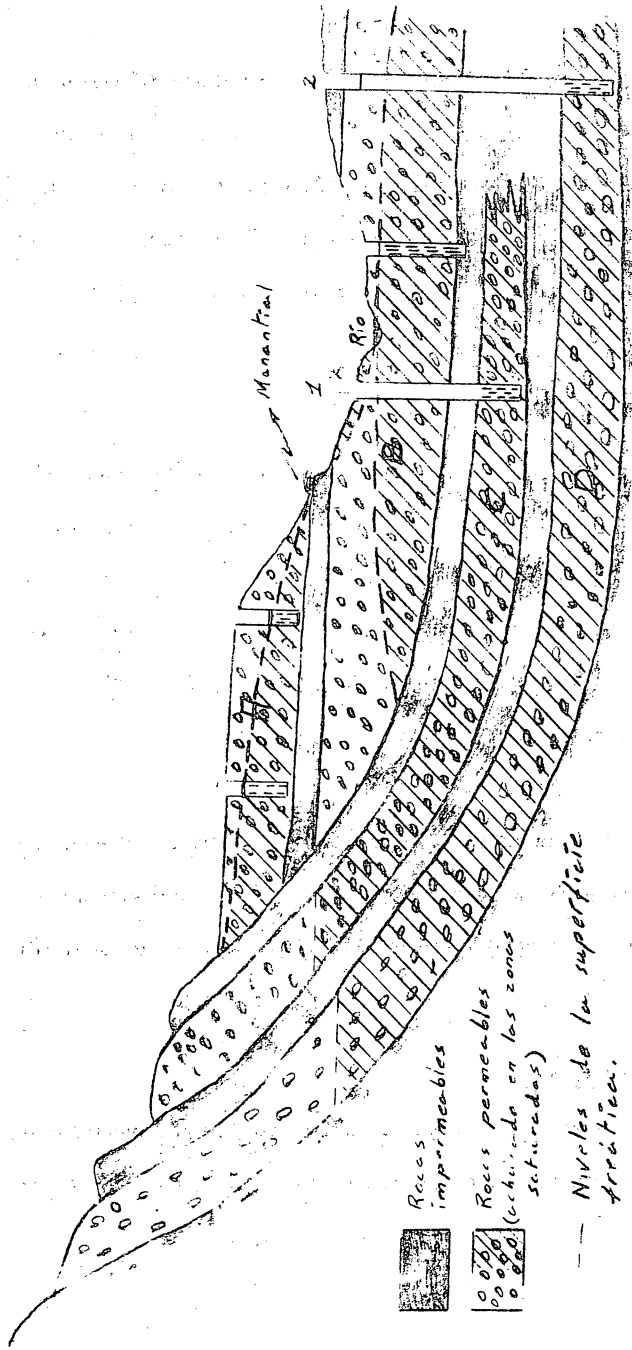
En la zona de rocas fracturadas, es decir, en aquella en que las cargas sufridas por las rocas están por debajo de su límite elástico, existen intersticios, y estos intersticios, por debajo de un cierto nivel, están saturados con agua. Estas son las llamadas aguas subterráneas, y las rocas cuyos intersticios están saturados son las que constituyen la zona de saturación. El agua que entra desde la superficie del terreno a estos intersticios desciende a llenarlos por gravedad, excepto la que es retenida por capilaridad en las zonas superiores. Las rocas permeables existentes por encima de la zona de saturación constituyen la zona de aireación, en la cual el agua que puede llenar parte de sus intersticios está retenida por sus paredes, con fenómenos de atracción superficial, o va descendiendo hasta la zona de saturación.

En la mayor parte de los casos sólo existe una zona de saturación, pero también puede haber una o varias capas impermeables en las zonas inferiores, y crean, a su vez, otras zonas superiores de saturación o mantos de agua "colgados", que no están en contacto hidráulico con los inferiores.

Aunque no exista, desde luego, ninguna relación directa entre la profundidad y la porosidad de una roca permeable, la porosidad, así como los intersticios grandes, tienden a dejar de producirse por debajo de una cierta profundidad.

En rocas del estrato cristalino la casi totalidad del agua subterránea se encuentra a menos de 100 m de la superficie. En rocas sedimentarias, tales como calizas a arenisca, las zonas ricas en aguas subterráneas se encuentran en algunos puntos a profundidades superiores a los 2 000 metros, aunque generalmente los caudales son muy pequeños, por debajo de los 700 metros. La disminución de la porosidad a grandes profundidades no es sólo debido a la causa mecánica de reducción de intersticios y grietas ante las grandes presiones, sino también a la cementación de los intersticios con las sales que contienen las aguas profundas, que son más pesadas por su gran contenido de materias en disolución.

En un terreno permeable desde su superficie, la superficie límite superior de la zona de saturación se llama superficie freática libre. Si, por el contrario, la zona de saturación está limitada superiormente por un manto impermeable, esta superficie freática libre no existe. En general, si excavamos un pozo en un terreno cualquiera, el pozo no dará agua hasta penetrar en una capa permeable saturada, es decir, en la zona de saturación. Si todo el terreno atravesado es permeable, al encontrar agua, el nivel de ésta coincide con el nivel superior de la zona de saturación en este punto, es decir, el nivel de la superficie freática libre en ese punto. Si el terreno que limita superiormente la zona de saturación es impermeable, cuando se encuentra el agua, ésta estará a una cierta presión y, por lo tanto, subirá en el pozo hasta una cierta altura, por encima de la cota en que se presentó originalmente. En este caso no existe la superficie freática libre (Fig 79). La capa permeable se dice que está en condiciones artesianas y la superficie piezométrica de presiones, supuesta definida por los niveles de infinito núme



A- Acuífero libre "colgado"; B- Acuífero libre alimentado por el río; C y D- acuíferos confinados; Los pozos 1 y 2 son pozos artesianos y el 1 es además brotante. El manantial surge donde el perfil topográfico intersecciona a un acuífero.

Fig 79

ro de pozos en contacto con la capa permeable, sería la superficie freática artesiana. Esta superficie no tiene, a diferencia de la superficie libre, existencia alguna real y puede considerarse como una representación geométrica del campo de presiones del agua en el acuífero artesiano (Fig. 79).

La zona de aireación ha sido dividida, por O. E. Meinzer, de acuerdo con la existencia y circulación del agua en su interior, en tres subzonas o mantos, que llama manto de evaporación, manto intermedio y manto capilar Fig. 78. El manto de evaporación está suficientemente próximo a la superficie para permitir que pase una cantidad considerable de agua de su seno a la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación directa del terreno. La evaporación directa, en general, no tiene lugar más que en la proximidad inmediata de la superficie, excepto en suelos muy arcillosos durante épocas prolongadas de gran sequía, en que la desecación y contracción subsiguiente de las arcillas va abriendo grietas que permitan que el proceso tome un carácter cíclico de desecación-contracción, extendiéndose por penetración hasta capas más profundas. En condiciones ordinarias es difícil que la evaporación directa se extienda a más de un metro de profundidad. En cambio, la transpiración vegetal puede afectar a zonas más profundas; por ejemplo, se han observado raíces del trigo hasta 2 metros de profundidad, de alfalfa hasta 9 metros y de algunas plantas desérticas hasta 15 metros y más.

El manto intermedio es lo que llama Meinzer "la tierra de nadie", entre el botánico o el técnico agrícola fundamentalmente interesado en el agua del terreno superficial y el técnico en hidrología subterránea, cuyo principal interés

está en la zona de saturación. Este mante intermedio contiene agua, aunque en su mayor parte esta agua está demasiado bajo para llegar a ser alcanzada por el crecimiento de las raíces, y, por otra parte, está demasiado "sujeta" por las fuerzas de atracción molecular para descender a formar parte de la zona de saturación. Sin embargo, no deja esta zona intermedia de tener interés para el ingeniero hidrólogo, especialmente en estudios de la recarga de los acuíferos inferiores, ya que el agua superficial tiene que pasar por ella antes de integrarse al almacén de la zona de saturación. En su seno se producen, desde luego, fenómenos de evaporación-condensación, atracción molecular y simple circulación de agua por gravedad, todos ellos relacionados entre sí.

El manto capilar es el que limita superiormente la zona de saturación y sus intersticios están en comunicación con ella, estando todos o en parte llenos de agua, mantenida por atracción capilar.

VIII-1 CALIDAD DE LAS AGUAS EN FUNCION DEL USO A QUE SE DESTINEN.

En vista de que el aprovechamiento de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, está gobernado por dos condiciones - cantidad y calidad - para satisfacer los requerimientos de su demanda y de sus características físico químicas y microbiológicas, es necesario sentar aquí un criterio claro sobre este último aspecto de la calidad, que es el que nos concierne. Así sería posible definir su factible y económica utilización, sobre todo, cuando puedan requerirse tratamientos correctivos para hacerlas aptas a los fines a que se destinen.

Tres usos básicos, dentro del aprovechamiento de aguas subterráneas, reclaman la utilización de cualquier pozo profundo de agua: Uso doméstico (para consumo humano), uso industrial y de riego.

En cada caso la calidad requerida para el agua varía en función de su uso y debe ser por ello objeto de un estudio claramente diferenciado.

Aguas para el uso doméstico.-

Las aguas utilizadas para fines de abastecimiento municipal deben ser de sabor y apariencia agradables; de composición química tal que pueda ser captada, transportada y distribuida sin presentar problemas de corrosividad o incrustaciones del sistema; y debe garantizarse que la calidad química y microbiológica no ponga en peligro la salud de sus consumidores.

Para cumplir con estos requisitos enunciados es necesario que el agua satisfaga una serie de normas de carácter internacional, que sobre el particular han sido fijadas por diversas autoridades sanitarias.

Tolerancias físicas.-

La turbiedad del agua no debe exceder de 5 p.p.m. (escala de sílice) ni el color de 15 p.p.m. (escala platino-cobalto).

El agua no debe presentar olores y sabores objetables, claramente detectables por sus consumidores. El número umbral de olor no debe exceder de tres.

Es aconsejable que la temperatura del agua no exceda de 5º C a la temperatura media del ambiente.

Tolerancias químicas.-

Para la presencia de iones tóxicos o venenosos se han fijado los siguientes límites superiores que obligan a un rechazo de la fuente de agua cuando en ella se rebasan los límites que a continuación se estipulan:

Plomo (Pb)	0,05 mg/l.	Plata (Ag)	0,05 mg/l.
Selenio (Se)	0,01 "	Bario (Ba)	1,0 "
Cromo hexavalente		Cadmio (Cd)	0,01 "
(Cr^{6+})	0,05 "	Cianuro (CN)	0,2 "
Arsénico (As)	0,05 "	Fluoruro* (F)	1,5 "

Los siguientes iones deben, preferentemente, no ocurrir en el agua en excesos por encima de los siguientes valores, sobre todo si existen otras fuentes probables de abastecimiento de agua.

Hierro (Fe)	0,3	mg/l.
Manganeso (Mn)	0,05	"
Cobre (Cu)	1,0	"
Extracción con cloroformo-columna de carbón (OCE)	0,2	"
Zinc (Zn)	5	"
Cloruros (Cl^-)	250	"
Compuestos fenólicos (como fenol)	0,001	"
Alquil Benceno Sulfonato (ABS)	0,5	"
Cianuro (CN)	0,01	"
Arsénico (AS)	0,01	"
Magnesio (Mg)	125	"
Sulfato ($SO_4^=$)	250	"
Nitratos (NO_3^-)	45	"

Sólidos totales: 500 mg/l., pero pudiéndose permitir hasta 1.000 si no fuese posible obtener un agua de mejor calidad.

Para mostrar algunas de las razones que provocan las limitaciones arriba citadas para esos iones, podemos mencionar que:

Plomo. Es un elementos tóxico venenoso cuando se acumula en el organismo (Provoca saturnismo).

Fluoruros. En concentraciones por encima de 1,5 mg/l., causan la denominada fluorosis dental o moteado del esmalte de los dientes. Además, la ingestión de 4 gr. de fluoruro sódico constituye una dosis mortal para el hombre. Concentraciones entre 0,8 y 1,2 mg/l. de fluoruros en el agua tiende a reducir las caries dentales hasta en un 65% en la población infantil que la ingiere.

Radiactividad. Límites: En vista de los efectos patológicos que pueden resultar por la exposición del hombre a las radiaciones atómicas, es necesario limitarle los períodos e intensidad a las exposiciones ionizantes.

En el caso de aguas de consumo, la exposición se limita suponiendo que otras posibles fuentes de radiación no resulten en una entrada de radiación al organismo, mayor a la estipulada por la guía de protección de radiaciones.

Se establece como límite máximo la cantidad de emisores de radiación equivalente a 10^{-4} microcurios/L.

Hierro y manganeso. Se limitan, principalmente por razones de apariencia, ya que provocan la coloración de las aguas que los contienen, tan pronto como sus compuestos quedan oxidados. Además, las aguas ferruginosas y manganosas adquieren un fuerte sabor metálico y provocan el manchado de piezas sanitarias y de ropas blancas cuando éstas permanecen en contacto con aguas cuyo contenido exceda los límites arriba especificados para estos dos elementos.

Calcio y magnesio. Un contenido apreciable de estos elementos provoca la denominada dureza en las aguas con el correspondiente consumo excesivo de jabón, que al combinarse con esos elementos forma precipitados insolubles (razón económica). El manganeso presente en combinación con el ion sulfato, puede provocar acción laxativa (Sal de Epson) y comunicarle al agua un sabor amargo desagradable.

Cloruros. Aun cuando no causa reacción fisiológica hasta que su concentración alcance la correspondiente a la de las aguas de mar ($\pm$ 35.000 mg/l.), concentraciones sobre los límites arriba especificados tienden a producir sabores salinos, todo dependiendo del grado de tolerancia que, por costumbre, puedan percibir los consumidores.

Nitratos. En 1945 fue establecido que un exceso de 60 mg/l. causaba metemoglobinemia, enfermedad presente en infantes con edades menores de 6 meses.

Sodio y potasio. Pueden producir acción deletérica en aquellas personas que sufren de alta tensión arterial. En general, con excepción de fuentes minerales muy cargadas, no produce consecuencias patológicas en el organismo humano.

Sulfatos. Provocan una acción laxativa en los consumidores cuando su concentración es apreciable en aguas de alto contenido mineral. La reacción es dependiente de la tolerancia individual de cada consumidor.

Alcalinidad. Tiene importancia su concentración en cuanto ella puede influenciar los tratamientos de coagulación. Ello en base a su fuerte poder amortiguador.

Tolerancia microbiológica. -

Si se efectúa un recuento total de bacterias aerobias en agar nutritivo y plantas incubadas a 37° C durante 24 hs.

Resultan convenientes

a) Menos de 50-65 colonias por m.l. de agua.

b) Presencia de bacterias fecales, pero ausencia de coliformes, estreptococos y clostridios sulfito reductores en 100 m.l. de agua sembrados en medios especiales para la prueba.

c) Ausencia total de gérmenes potencialmente patógenos y del "Escherichia coli" o de los bacteriofagos anti "E. coli" y anti "Shigella".

Son tolerables

a) Menos de 100 colonias por m.l. de agua.

b) Presencia de coliformes, estreptococos fecales y clostridios sulfito - reductores, máximo de 1 a 2 de cualquiera de estos germenes en - las siembras efectuadas con un volumen mínimo de 100 m.l. de - agua.

Se anexa un cuadro comparativo de las máximas físicas, químicas y bacteriológicas establecidos en algunos países americanos.

Aguas para el uso industrial y agrícola.

En general, es imposible cumplir con los requerimientos específicos de las tantas industrias que puedan utilizar fuentes de abastecimiento para aguas de procesamiento. Por esta razón, muchas de las industrias poseen sus propias fuentes de abastecimiento de agua, o aplican tratamientos correctivos complementarios y -

CUADRO COMPARATIVO DE LAS MÁXIMAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BACTERIOLÓGICAS PERMITIDAS POR LAS NORMAS DE CALIDAD PARA AGUAS POTABLES DE ALGUNOS PAÍSES AMERICANOS.

	México	EE. UU. Colombia y Panamá	Argentina	Brasil	República Dominicana	Perú	Uruguay	Venezuela
Color	Incolora	20		Incolora	Incolora	20	30	10
Turbiedad	Transparente	10		Transparente		10	10	
Olor	Inodora	Inodora		Inodora	Inodora	Inodora		
Sabor	Insípida	Agradable		Agradable	Agradable	Agradable		
pH	De 6,8 a 7,5	*a*		8,4	Neutro o ligeramente alcalino	*a*	Neutro o ligeramente alcalino	
Alcalinidad F		*a*				120	8	
Alcalinidad A M	250	*a*	*b*				400	50
Dureza total	300		300-(700)		320		350	300
Dureza no carbonatos	150							
Calcio (Ca^{++})					86		72	
Magnesio (Mg^{++})		125	*b*		24	125	15	
(Ca^{++} + Mg^{++}) en (Ca^{++})	120		120-(280)		128		140	120
Sulfato (SO_4^{--})		250	300		200	250	176	250
Cloruros (Cl^-)	40	250	600	5	70	250	243	250
Sólidos totales	500	500-1.000	2.000		De 130 a 500	500-1.000	500-1.000	
Hierro (Fe^{+++})			0,3	0,3			0,3	
Manganeso (Mn^{++})			0,2				0,1	
(Fe^{+++} + Mn^{++})		0,3	0,4			0,5		
Cinc (Zn)		15		15		15	5	
Cobre (Cu)		3,0		3,0		3,0	0,2	
Aluminio (Al)							0,75	
Sílice (SiO_2)							30	
Cromo (Cr^{+++})		0,05						
Plomo (Pb)		0,1		0,1		0,1	0,02	
Selenio (Se)		0,05		0,05		0,05		
Arsénico (As)		0,05	0,15	0,05		0,1	0,1	
Fluor (F)		1,5	1,0-1,5	1,0		2,0	1,5	
Vanadio (V)						0,1		
Nitrito (NO_2^-)	0		0,5		0	Huellas	0,0-0,1	
Nitrato (NO_3^-)	22			7,4	20	228	0,5-10,0	
Amoniaco (NH_3)	0,64			0.013	0		0,05	0,01
N. albuminoide	0,1			0,005			0,12	
Oxígeno cons. (ácido)	3,0			2,0			3,0	2,0
Oxígeno cons. (alcalino)	3,0							
Colonias en agar, por ml.								
En 48 horas, a 20° C							500	
En 24 horas, a 37° C	200						100	50-300
Colimetría:								
Siembra en caldo lactosado								
Porciones de 10 ml. positivas	1 : 5	10 %				5 %		
Porciones de 100 ml. positivas		60						
Indices de coliaerógenes, en 100 ml.	2,2	0,92	2,0-2,2	4		2,2	2,2	1,0
Indice de *E. coli*, en 100 mililitros								

a) Límites variables para aguas tratadas, relacionando pH, alcalinidad y dureza.
b) Límite máximo de dureza que se considera económico ablandar.
c) La primera cifra fija el límite más recomendable; la segunda, el máximo permisible.
d) Límites máximos para aguas de pozos.
e) Límites máximos para aguas superficiales.
f) Límite condicionado a un número mínimo de muestras mensuales, en función de la población, con tolerancia por las alteraciones ocasionales.
g) La primera cifra fija el índice para aguas profundas; la segunda se aplica a aguas superficiales tratadas o a aguas superficiales o tratadas de las redes de distribución.
h) La cifra se refiere al número mensual de muestras (con tres o más tubos positivos) que se consideran contaminadas; el número de muestras queda en función de la población servida, como en la Norma Americana.

específicos a las aguas suplidas por las municipalidades. Por otra parte, multitud de calentadores y evaporadores en lavanderías, industrias de agua carbonatada, - etc., dependen directamente de la calidad de las aguas del abastecimiento municipal.

En base a esto último, es conveniente aplicar a las aguas límites de calidad química, al menos en lo concerniente a los contenidos de hierro y manganeso y al mantenimiento de un bajo contenido mineral (para el caso de lavanderías, fábricas de hielo, etc.), pero sin llegar al límite de hacerlas por ello corrosivas.

Además, en industrias, es de suma importancia que el agua esté libre de - sedimentos (para el caso especial de refrescos carbonatos) y de materias orgánicas y de otros compuestos que produzcan olores y sabores a los productos industriales en los cuales el agua es la materia prima esencial.

En vista a lo variado de los requerimientos para determinadas industrias, se ha creído conveniente incluir, en cuadro anexo, las limitaciones de calidad del - agua para determinados usos industriales.

Por lo que respecta a la calidad del agua que se deba utilizar para la - agricultura, existen varias clasificaciones todas ellas con ventajas e inconvenientes pues su aptitud depende de varios factores que ninguna de ellas considera en su totalidad. Una de las comunmente usadas en la actualidad se basa en la concentración relativa del sodio respecto al calcio y magnesio denominada SAR, esta relación es la siguiente:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

expresadas las concentraciones en m.e./L.

TOLERANCIAS PARA APLICACIONES INDUSTRIALES.

Industria	Turbiedad	Color	Color + O. consumido	O.D.	Olor	Dureza	Alcalinidad	pH	Sólido totales		Ca	Fe	Mn	Fe + Mn	Al_2O_3	SiO_2	Cu	F	CO_3	HCO_3	OH	$CaSO_4$	Na_2SO_4 a Na_2SO_4 relac.	General [1]
	ppm.	ppm.	ppm.	ml/l.		ppm.	ppm.		ppm		ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.	ppm.		
Aire acondicionado [2]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	0,5	0.5	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	A, B
Horneados	10	10	—	—	—	—[3]	—	—	—	2	—	0,2	0.2	0.2	—	—	—	—			—	—	—	C
Alimentación calderas:																								
0-150 lb/pulg²	20	80	100	2	—	75	—	8,0 +	300-1000	3	—	—	—	—	5	40	—	—	200	50	50	—	1 a 1	—
150-250 lb/pulg²	10	40	50	0,2	—	40	—	8,5 +	2500-500	4	—	—	—	—	0.5	20	—	—	100	30	40	—	2 a 1	—
250 lb/pulg² y más	5	5	10	0	—	8	—	9,0 +	1500-100	5	—	—	—	—	0.05	5	—	—	40	5	30	—	3 a 1	—
Cerveza: [4]																								
Clara	10	—	—	—	bajo	—	75	6,5-7,0	500	6	100-200	0,1	0,1	0,1	—	—	—	1	—	—	—	100-200	—	C, D
Obscura	10	—	—	—	bajo	—	150	7,0	1000	7	200-500	0,1	0,1	0,1	—	—	—	1	—	—	—	200-500	—	C, D
Enlatado:																								
Legumbres	10	—	—	—	bajo	25-75	—	—	—	8	—	0,2	0,2	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	C
General	10	—	—	—	bajo	—	—	—	—	9	—	0,2	0,2	0.2	—	—	—	1	—	—	—	—	—	C
Bebidas carbonatadas [5]	2	10	10	—	0	250	50	—	850	10	—	0,2	0,2	0.3	—	—	—	0.2	—	—	—	—	—	C
Industs. manufactureras	—	—	—	—	bajo	—	—	—[6]	100	11	—	0,2	0,2	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Refrigeración [7]	50	—	—	—	—	50	—	—	—	12	—	0,5	0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	A, B
Alimentos, general	10	—	—	—	bajo	—	—	—	—	13	—	0,2	0,2	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	C
Hielo (agua cruda) [8]	1-5	5	—	—	—	—	30-50	—	300	14	—	0,2	0,2	0,2	—	10	—	—	—	—	—	—	—	C
Lavandería	—	—	—	—	—	50	—	—	—	15	—	0,2	0,2	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Plásticos, clara, sin color	2	2	—	—	—	—	—	—	200	16	—	0,02	0,02	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Papel y pulpa: [9]																								
De madera	50	20	—	—	—	180	—	—	—	17	—	1,0	0,5	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	-	A
Pulpa. Kraft	25	15	—	—	—	100	—	—	300	18	—	0,2	0,1	0,2	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—
Soda y sulfito	15	10	—	—	—	100	—	—	200	19	—	0,1	0,05	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Papel liviano	5	5	—	-	—	50	—	—	200	20	—	0,1	0,05	0,1	—	—		—	—	—	—	—	—	B
Rayon (viscosa) pulpa:																								
Producción	5	5	—	—	—	8	50	7,8-8,3	100	21	—	0,05	0,03	0,05	<8,0	<25	<5	—	—	—	—	—	—	—
Manufacturera	0,3	—	—	—	—	55	—	8,0	—	22	—	0,0	0,0	0,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tenería [10]	20	10-100	—	—	—	50-135	135	—	—	23	—	0,2	0,2	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Textiles:																								
General	5	20	—	—	—	20	—	—	—	24	—	0,25	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Secado [11]	5	5-20	—	—	—	20	—	—	—	25	—	0,25	0,25	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lana [12]	—	70	—	—	—	20	—	—	—	26	—	1,0	1,0	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Vendajes algodón [12]	5	5	—	—	bajo	20	—	—	—	27	—	0,2	0,2	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

[1] A = Sin corrosión; B = Sin formación de babas; C = Conformación normas federales de agua potable; D = NaCl, 275 ppm.

[2] Aguas con algas e hidrógeno sulfurado son las menos apropiadas para aire acondicionado.

[3] Alguna dureza deseable.

[4] Agua para destilación debe llenar los mismos requerimientos generales que para cervezas.

[5] Clara, inodora, agua estéril para jarabes y carbonatados. Agua mostrando consistencia en su calidad. La mayoría de las aguas tratadas en plantas municipales no son satisfactorias para confección de bebidas.

[6] Caramelos duros requieren pH 7,00 o mayor valores menores favorecen inversión de la sucrosa causando productos pegajosos.

[7] Control de corrosión necesaria como también de organismos tales como bacterias del hierro y del azufre que tienden a formar babas.

[8] $Ca(HCO_3)_2$; particularmente problemático. $Mg(HCO_3)_2$ tiende a enverdecer el color. CO_3 ayuda a prevenir roturas. Sulfatos y cloruros de Ca, Mg. Na deben ser menores a 300 ppm.

[9] Deseable uniformidad de composición y temperatura. Hierro objetable, a causa de la celulosa absorbe el hierro de soluciones diluidas. Manganeso muy objetable, tapona tuberías y es oxidado a permanganato con el cloro, causando aguas rojizas.

[10] Excesivo contenido de hierro, manganeso o turbiedad crea manchas y decoloración en curtido de cueros y objetos confeccionados.

[11] Composición constante; aluminio residual < 0,5 ppm.

[12] Calcio, magnesio, hierro y manganeso, materia suspendida y materia orgánica soluble pueden ser objetables.

También se toma en cuenta la conductividad eléctrica que se relaciona con el contenido total de sales.

Así se forma la clasificación de Wilcox que es como sigue:

Las 16 categorías del agua, establecidas con las características de conductividad (C) peligro de alcalinización del suelo (S) se establece combinando las diferentes clases de una y otra.

C - 1.- Agua de baja salinidad. Conductividad entre 100 y 250 micromhos/cm que corresponden aproximadamente a 64-160 mgr/l. de sólidos disueltos. Puede usarse para la mayor parte de los cultivos, en casi todos los suelos con muy poco peligro de que desarrolle salinidad. Algún lavado, que se logra normalmente con el riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

C - 2.- Agua de salinidad media. Conductividad entre 250 y 750 micromhos/cm., correspondiendo aproximadamente a 160-480 mgr/l. de sólidos disueltos. Puede usarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se pueden cultivar, en la mayoría de los casos, las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

C - 3.- Agua altamente salina. Conductividad entre 750 y 2.250 micromhos/cm. correspondiendo aproximadamente a 480-1.440 mgr/l. de sólidos disueltos. No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Selección de plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad de control de la salinidad del suelo, aún con drenaje adecuado.

C - 4.- Agua muy altamente salina. Conductividad superior a 2.250 micromhos/cm. (aproximadamente 1.440 mgr/l de sólidos disueltos). No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Pueden utilizarse con una selección

de cultivos en suelos permeables, de buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.

S - 1.- Agua baja en sodio. Pueden usarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable. Cultivos sensibles, como frutales de hueso pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

S - 2.- Agua media en sodio. Puede representar un peligro en condiciones de lavado deficiente, en terrenos de textura fina con elevada capacidad de cambio catiónico, si no contiene yeso.

S - 3.- Agua alta en sodio. En la mayor parte de los suelos puede alcanzarse un límite de toxicidad de sodio intercambiable, por lo que es preciso un buen drenaje, lavados intensos y adiciones de materia orgánica. En los suelos yesiferos el riesgo es menor.

S - 4.- Agua muy alta en sodio. En general inadecuada para riego excepto con salinidades baja o media, siempre que se pueda posibilitar su empleo con la disolución del calcio del suelo, el uso del yeso o de otros elementos.

VIII-2 DRENAJE.-

Puede definirse sencillamente como la "eliminación del exceso de agua y sales que puedan contener los suelos". Esta amplia definición del drenaje es aplicable tanto cuando se emplea en ingeniería como cuando constituye una de las prácticas agrícolas.

Excavaciones de desagüe para cimentaciones.

Una excavación deberá estar suficientemente seca si es que ha de recibir concreto u otros materiales que constituyen los cimientos de una construcción. - Engeneral, el nivel natural de aguas subterráneas suele ser más alto que el fondo del vaciado, incluso si se deprime mediante la excavación de zanjas, el problema entonces, consiste en extraer, mediante bombeo, el agua necesaria para mantener la superficie de depresión por debajo del nivel previsto para el fondo de - la excavación. En excavaciones reducidas se práctica un sumidero profundo situado en una esquina de la zona, que se rellena con material grueso filtrante, tal - como grava limpia, y el agua afluente se extrae mediante bombeo.

En los trabajos modernos el agua se elimina mediante el empleo de perforaciones puntuales.

Existen varios sistemas de pozos de bombeo puntuales. En lo fundamental un pozo puntual se compone de una tubería perforada y protegida por red, de - 1½ pulgadas de diámetro, aproximadamente, y de unos pocos pies de longitud. Esta cabeza va fija en la extremidad de un tubo elevador, del mismo diámetro, - y el todo se hinca conjuntamente, con inyección de agua o sin este requisito. Si el suelo no es de por sí suficientemente permeable, se practica una abertura alrededor del elevador que se rellena con material filtrante, como puede ser grava fina o arena gruesa. Cada uno de los diversos tubos elevadores se une a un colector general, que, a su vez, empalma con una bomba (Fig. 80). Las líneas de - perforaciones pueden situarse en las márgenes de la excavación, bien en un solo lado, bien rodeándola por completo. En la construcción general de edificios u -

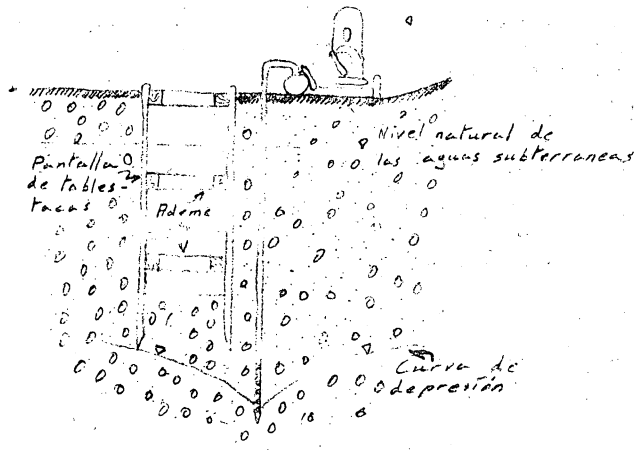


Fig. 80 Pozos puntuales

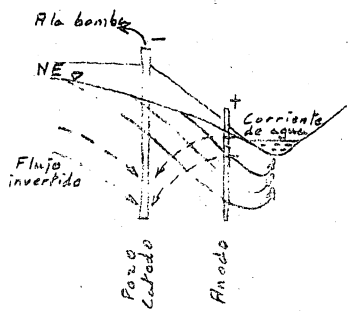


Fig 81. Inversión del flujo natural de las aguas subterráneas mediante electroósmosis

obras públicas, los pozos puntuales se colocan a una distancia entre ejes de 1 a 2 m. Las capacidades posibles de elevación por succión con este sistema quedan comprendidas entre 4.5 y 7.5 m, disminuyen con las altitudes de las localidades y dependen en grado sumo de la eficiencia del mismo.

Pozos profundos.

Si el acuífero que ha de ser objeto de desagüe es espeso y de gran permeabilidad, y si se proyecta la ejecución en él de excavaciones profundas, suelen dar resultados más satisfactorios los pozos profundos equipados con turbinas que los pozos puntuales.

Las instalaciones aisladas e independientes de las bombas en pozos profundos son de rendimiento más eficaz que los pozos puntuales, y el límite de elevación de aguas no tiene más tope que los que imponen el diámetro y profundidad del pozo y la capacidad de las bombas. Los pozos de turbina pueden situarse, además, fuera del área de actividades. Las instalaciones se construyen para trabajar con entera independencia, y se evita la construcción escalonada de pozos puntuales que interfiera con las operaciones de la construcción. El costo inicial de los pozos profundos puede que sea más alto, pero el costo normal de su operación viene a ser el mismo que el del sistema de pozos puntuales. Los pozos profundos desarrollan su trabajo con más eficacia y rendimiento, están menos sujetos a averías, y en muchos casos son mucho más flexibles para hacer frente a casos de emergencia.

Con ambos sistemas (pozos puntuales y profundos), una vez iniciado el bombeo debe continuarse hasta que termine por completo el trabajo de excava-

ción. El fallo de la bomba o de la energía motriz es de consecuencias desastrosas, de manera que han de tomarse las debidas precauciones y tiene que haber un mecánico de servicio las veinticuatro horas del día. No debe olvidarse que, tanto en el caso de pozos puntuales como en el de turbinas, la máxima extracción se realiza en la ubicación misma de la perforación. La zona de saturación es siempre algo más alta entre pozos. Los proyectos deben basarse, por consiguiente, en las máximas depresiones entre los puntos de extracción del agua.

Electroósmosis.-

Si se hincan dos electrodos en el interior de una masa terráquea saturada, existe una tendencia general de las aguas a fluir del ánodo al cátodo. Tendencia que ilustra en forma esquemática la figura 80, en la que las líneas de flujo llenas representan su transcurso antes de aplicar la corriente eléctrica y las de trazos corresponden al flujo cuando queda invertido por la acción electroosmótica. En tales casos el cátodo consiste en un tubo perforado que realiza además la misión de extraer el agua. El fenómeno de flujo electroosmótico puede explicarse de manera simplificada. Existe una doble capa eléctrica en la superficie de cada partícula de arcilla, correspondiendo la carga negativa a la capa interior, mientras que la exterior se compone de iones positivos. Cuando se constituye un campo eléctrico los iones positivos se mueven hacia el cátodo transportando con ellos moléculas de agua asociadas.

Los intentos de aplicar este método a las arenas, incluso a las muy finas están concenados al fracaso. Su aplicación óptima es en el caso de desagüe de limos y arcillas limosas, y puede sustituir muy bien al de las perforaciones puntua

les, que no siempre es eficaz en tales clases de suelos.

Una pantalla de tablestacas metálicas puede utilizarse como ánodo, aunque el mismo objeto puede conseguirse con tuberías o varillas viejas de hierro de 1-2 pulgadas de diámetro. Los ánodos están expuestos a considerable corrosión durante el transcurso de unas pocas semanas de aplicación del método y necesitan - - remplazarse. En general, los ánodos y los cátodos deberían alcanzar las mismas profundidades, aunque haya excepciones a esta regla.

Drenaje subterráneo en ingeniería.

Para la recogida y eliminación de las aguas subterráneas, cuando son perjudiciales, se emplean atarjeas o drenajes subterráneos. Se forma una atarjea colocando una tubería en el interior de una trinchera que se rellena después con material filtrante de adecuada gradación y que hay que proteger contra el relleno de sus huecos por material fino, limoso, procedente de la superficie. Una atarjea a la "francesa", o ciega, es igual que la que se acaba de describir, pero sin la tubería. Antes de comenzar la instalación del drenaje es aconsejable rebajar el nivel local de aguas subterráneas mediante la apertura de zanjas abiertas.

El material de relleno debe ser lo suficientemente fino como para impedir el acceso del suelo adyacente al interior de la tubería, y lo bastante basto para que aquél no penetre por las perforaciones o juntas de la tubería. El material - de los suelos que entrase en los tubos de avenamiento los "cegaría" o atascaría.

El drenaje subterráneo de grandes superficies, como los que se practican - en aeropuertos o grandes edificaciones, se proyecta conjuntamente con el superficial, sobre la base de un plano de niveles de vaciado, con indicación de las al-

turas de los rellenos y las profundidades de las trincheras y vaciados. Las áreas más reducidas, como, por ejemplo, parques y parques de recreo, pistas de carreras, hipódromos y otras similares, se drenan también por un sistema análogo.

Todos los drenajes deben tener sus aberturas de evacuación o bocas de salida despejadas y limpias.

El drenaje agrícola consiste en la eliminación o evacuación del exceso de agua, así como de las sales perjudiciales, con objeto de capacitar las tierras para los cultivos. Los suelos que exigen imperiosamente el drenaje son los siguientes:

1.- Los suelos salinos que contienen sales de alta solubilidad, las cuales pueden tratarse por levigación.

2.- Los suelos alcalinos que, como consecuencia de las características de dispersión del corte o perfil de sus suelos, no son susceptibles de lavado y exi-- gen tratamiento químico especial, con yeso o azufre, por ejemplo.

3.- Los suelos alcalinos-salinos que, cuando son objeto de irrigación son semejantes al principio a los suelos salinos, pero que, una vez eliminados los suelos solubles, manifiestan características de suelos alcalinos con sus secuelas de reducida permeabilidad, textura ligada, e incapacidad final como suelo productivo.

CAPITULO IX

GEOLOGIA DE PRESAS.

Tres cualidades distinguen las presas de las otras estructuras de ingeniería: 1) la acumulación, nada corriente, de grandes masas de materiales de edificación y agua en una área limitada de la superficie terrestre y, por tanto, presiones sumamente pesadas sobre la cimentación; 2) influencia destructora del agua en el embalse sobre la cimentación y sobre la estructura misma, lo que puede producir filtraciones, erosión o rotura, y 3) emplazamiento siempre en un valle. Por lo tanto: las presas dependen de las condiciones de los alrededores, particularmente de la geología del sitio, en un margen mayor que las otras obras de ingeniería, y en el caso de grandes presas se realizan siempre pre-estudios geológicos adecuados. Sin embargo, aun para pequeñas presas, es más económico pagar a un geólogo que cargar con las consecuencias de una rotura de la presa debida a condiciones no previstas.

La construcción y el mantenimiento apropiados de estos tipos de obras son vitales, ya que sus roturas pueden producir - y de hecho han producido - cientos de muertes y originan millones de dólares de daños. Por lo tanto, una característica adicional que distingue las presas es que, al revés que las otras obras de ingeniería, su rotura puede acabar en serias pérdidas de vidas y propiedades.

IX-1.- TERMINOLOGIA Y DEFINICIONES

Clasificación de las presas.

Las presas se construyen para acopiar agua para usos de la comunidad e industrial, para irrigación y para regulación de corriente; para el desarrollo del poder hidroeléctrico, para canalización de ríos, y para retención de fango o material arrastrado. Una presa que sirva para más de un fin se llama presa múltiple. Una presa de desvío o derivación es la que se destina en principio a desviar el agua del río. Las presas también se clasifican según el material de que están construidas. Por lo tanto, hay presas de mampostería de concreto, de tierra y de roca.

El tipo de presa que se tiene que usar en cada localidad es punto de considerable estudio. La seguridad es la primera consideración, y luego el costo, que incluye el costo inicial y el mantenimiento anual. La seguridad requiere que la cimentación y los soportes laterales sean adecuados para el tipo de presa elegido. El estudio de costo debe tener en cuenta, entre otros factores el método de construcción de las cimentaciones, la idoneidad de la topografía y la facilidad de adquisición de los materiales de construcción.

Terminología.

Algunos de los términos más comúnmente usados para describir las partes de una presa (Fig. 82) son los siguientes:

Estribos. Pueden ser las laderas de un valle sobre las cuales se construye la presa o la porción misma de la presa que queda en esa parte del valle. El geólogo generalmente usa la palabra "estribo" en el sentido primero, mientras que el ingeniero la emplea en el sentido de la último definición, por analogía -

con los estribos de un puente.

Sección de río o canal. La parte central de la presa que directamente está sobre el canal del río o aquella parte del valle que está así situada.

Talón de la presa. La parte aguas arriba de la presa donde está en contacto con la superficie que la soporta (es decir, el fondo o roca del cimiento).

Línea de base. La parte aguas abajo de la presa donde toma contacto con la superficie que la soporta.

Cresta. La parte superior de la presa. Si se construyen muros a lo largo de la cresta, para dar paso a una carretera, estos muros comúnmente se llaman muros de parapeto.

Desnivel. La distancia entre el nivel más alto del agua en el depósito y la parte superior de la presa.

Eje de la presa. Una línea imaginaria arbitraria trazada o bien a lo largo del centro exacto de la planta de la cresta o a lo largo de la arista formada por la parte aguas arriba de la cresta con la cara aguas arriba de la presa. Realmente, esta línea es sólo de referencia y prácticamente puede establecerse en casi cualquier posición de la presa.

Sección transversal de la presa. Corrientemente trazada en un plano vertical que es perpendicular al eje de la presa.

Galerías. Aberturas formadas dentro de la presa. Pueden ir transversalmente o longitudinalmente y pueden ser horizontales o tener cierto grado de inclinación. Facilitan el desagüe del agua que rezuma a través de la cara o de la cimentación, actúan como galerías para perforar túneles y canales de desagüe y permiten el paso del equipo dentro de la presa para observar su funcionamiento.

Superficie de agua muerta. Es la altura del depósito por debajo de la cual el agua está permanentemente en el depósito y no puede extraerse. También incluye el depósito de azolve, que es esa parte de la cuenca del depósito reservada para almacenar cualquier fango que pueda entrar y depositarse. El espacio de depósito del azolve deberá estudiarse atentamente en todos los cálculos para determinar la cantidad real de agua que debe almacenarse.

Superficie mínima de agua. Es la elevación más baja a la cual puede descender el depósito de forma que el agua pueda todavía extraerse por medio de los desagües o por las compuertas de la sala de máquinas.

Superficie máxima de agua. Es la altura más alta a la cual puede almacenarse el agua en el depósito sin rebasar la presa o sin que salga por los vertedores.

IX-2.- TIPOS DE PRESAS

Presas de gravedad.

Una presa de gravedad se construye de concreto o de albañilería sólida. Su eje puede ser una línea recta levemente curvada aguas arriba, o una combinación de curvas y líneas rectas para aprovechar mejor las condiciones topográficas. Su sección transversal suele ser, aproximadamente, trapezoidal, acercándose a la forma del triángulo (Fig. 82). Aunque siempre es deseable una roca firme para los cimientos de esta clase de presas, también se han construido sobre roca variable, fracturada, y aun sobre terraplenes de río. Si la topografía presenta un cañón ancho con un declive ligero, puede dar buen resultado una presa de tipo de gravedad, como más económica y también como el tipo más factible.

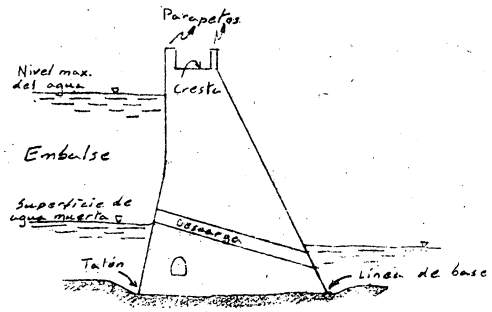


Fig. 82. Sección transversal esquemática de una presa.

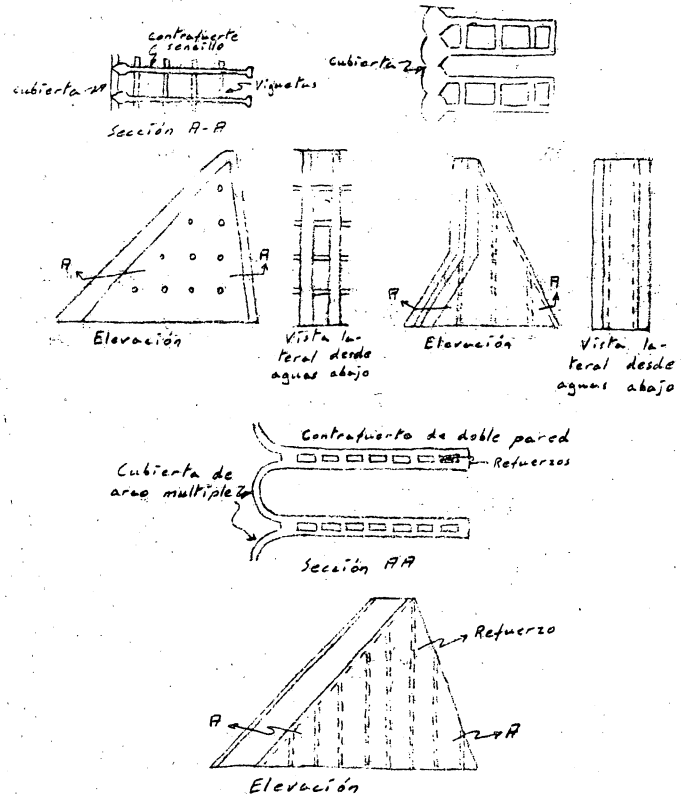


Fig. 83. Tipos de presas de contrafuerte

Presas de contrafuerte.

Una presa de contrafuerte está compuesta principalmente de: 1) un flanco aguas arriba de concreto armado que recibe la carga de agua, y 2) contrafuerte con sus ejes perpendiculares al plano de la presa, los cuales sostienen el paredón o bóveda y transmiten la carga del agua a la cimentación. Los contrafuertes pueden ser de un solo muro, huecos o de doble muro. Hay varios tipos de presas de contrafuertes, los principales son: 1) el tipo de paredón liso en el cual la bóveda del paredón de concreto [redacted] se extiende sobre el claro entre dos contrafuertes adyacentes; 2) tipo de bóveda múltiple con el cual cada unidad del miembro que soporta el agua es un arco inclinado sostenido por los contrafuertes.

Corrientemente las presas de contrafuertes necesitan buenos cimientos. Los contrafuertes son bastante estrechos y actúan como muros muy cargados, que ejercen tremendas presiones unitarias sobre el cimiento subyacente. En vista de que el espacio entre los contrafuertes no está cargado, existe la posibilidad de que, en materiales pobres, el contrafuerte puede "introducirse" en el suelo, causando un deterioro en el material de entre los contrafuertes.

Presas de arco o bóveda. [redacted]

Una presa de arco está compuesta de un único muro de concreto de planta curva con su cara aguas arriba convexa, con lo que parte de la carga del agua se transmite a los estribos de roca adyacentes por intermedio de la acción del arco. En todas las presas curvas, parte de la carga del agua pesa directamente sobre la cimentación siendo transmitida a través de la masa de la presa, y parte se transmite a los estribos por la acción del arco. Si esta distribución de carga es

aproximadamente igual, entonces la presa se considera como presa de arco-gravedad o de gravedad-arco. Donde una proporción considerable de la carga se transmite por medio de la acción del arco a los estribos, la presa puede llamarse una presa de arco-delgado.

Para que la acción del arco sea realmente efectiva, los estribos deberán ser lo más inmóviles posible. [redacted], La roca del estribo debe satisfacer ciertos requisitos rigurosos y el mismo arco debe estar perfectamente calzado en los estribos.

Vertedores.

Este término se aplica a una dependencia de la presa que permite pasar el agua por encima de ella o por sus lados. El vertedor es una obra de [redacted] que lleva el agua desde el valle aguas arriba de la presa hasta corriente abajo del valle sin estropear los muros de la presa o embalse y sin erosionar la cimentación o línea de base de la presa. Corrientemente los vertedores empiezan a operar cuando el agua del depósito se eleva por encima del nivel máximo. En el tipo más simple, el agua puede fluir por encima de la cresta de la presa.

Compuertas de diferentes tipos permiten abrir y cerrar el vertedor, que se abre completa o parcialmente. Un [redacted] no regulable es uno en el cual las compuertas no se usan y por el contrario uno regulable es aquel en el que se usan las compuertas.

Tipos de [redacted] vertedores.

Un vertedor puede diseñarse en la forma de un canal abierto de sección transversal rectangular o trapezoidal que permite dirigir el flujo del agua desde

el depósito hasta el valle. Un vertedor de este tipo se llama corrientemente de regulación normal y se puede componer de un canal corto de llamada seguido por la cresta del vertedor, el canal propiamente dicho y el tanque de amortiguación (Fig. 84)

En los vertedores de embudo, (Fig. 85) o de pozo [redacted], el exceso de agua en el depósito cae vertical u oblicuamente en un embudo y se lleva aguas abajo más o menos horizontalmente en un túnel de concreto, generalmente bajo la presa. El borde del embudo se halla en la superficie máxima del agua del embalse. El vertedor en salto tiene un borde voladizo sobre la cara de la presa (solamente usado en presas de concreto). Este borde hace que el agua "salte" en el aire y caiga a una distancia segura aguas abajo de la línea de base de la presa, con lo que evita de esta forma que el pie se erosione.

IX-3.- PROBLEMAS Y ROTURAS

Fuerzas que actúan sobre una presa.

Las fuerzas que actúan sobre una presa de albañilería durante la construcción y después pueden ser estáticas o dinámicas. Las fuerzas verticales estáticas que actúan hacia abajo son el peso del concreto y del refuerzo de acero y el peso de los puentes, compuertas y otras estructuras complementarias, y el peso del agua y del sedimento (fango) que va en ella y que se deposita sobre las caras en pendiente de la presa. Una gran parte de la presa está sumergida y, por lo tanto, la fuerza de flotación, igual al peso del agua desalojada, actúa hacia arriba y disminuye el conjunto de las fuerzas estáticas que actúan hacia abajo.

Las fuerzas horizontales que actúan sobre la presa se deben primeramente a la presión lateral del agua y del fango depositado en el embalse detrás de la presa.

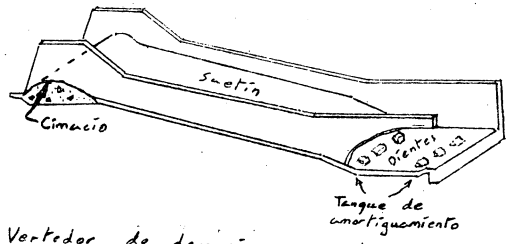


Fig. 84. Vertedor de demasías normal

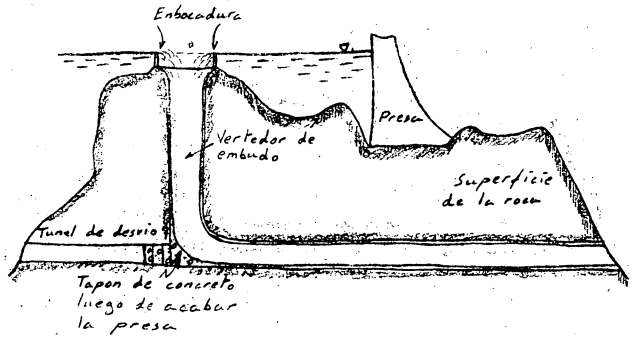


Fig. 85. Sección transversal de un vertedor de embudo.

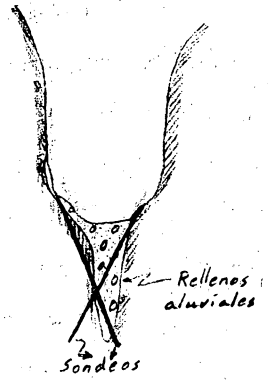


Fig. 86. Rellenos aluviales en una boquilla estrecha.

Los cambios de temperatura pueden producir tensiones adicionales en la estructura; las tensiones por temperatura pueden ser particularmente perjudiciales en las presas de arco, y por eso se tienen en cuenta en el proyecto. Las fuerzas dinámicas más importantes que actúan sobre la presa son la acción de las olas, sobreflujo de agua, choque y fenómenos sísmicos.

Problemas de deslizamiento: acción del agua en rocas estratificadas.

La mayoria de las roturas de las presas sobrevinieron después de grandes lluvias. El agua de las tormentas es un serio factor que contribuye a las roturas por deslizamiento de la presa (como lo es también en muchos corrimientos de tierras). La acción del agua en roca estratificada en cimentaciones de presa es triple:

1.- El agua lubrica las superficies de roca secas y disminuye el coeficiente seco de fricción entre ellas (excepto, aparentemente, con el cuarzo).

2.- El agua que se mueve entre los estratos no solamente disuelve el material de cimentación, sino lo erosiona por una accion puramente mecánica, aumentando de este modo el volumen de las aberturas y formando cavernas.

3.- Si los intersticios entre los estratos están saturados, es decir, llenos completamente de agua, el último está bajo una presión hidrostática directamente proporcional a la presión de la columna de agua o distancia vertical hasta el nivel del agua en el depósito. Como este nivel aumenta durante una tormenta de agua y después, la presión intersticial aumenta en proporción. La presión creciente tiende a elevar los estratos de roca superiores y la misma presa disminuyendo por tanto la resistencia de cizalla de la roca, es decir, la resistencia a deslizarse dentro de la roca, aunque el valor del coeficiente de friccion en la -

base de la presa no se altere.

Problemas de asentamiento y recuperación.

Bajo la presión de su peso y de otras fuerzas verticales (o componentes verticales de fuerzas) que actúan sobre ella, la presa se asienta. El llenado del embalse produce un asentamiento adicional de la presa. En el caso de embalses extremadamente grandes, el peso del agua y del limo también puede producir que toda la zona que rodea el embalse se hunda, como ocurrió en el área de la presa Hoover, en Nevada. Deberá notarse que cualquier asentamiento se compone de una parte elástica (reversible) y una parte plástica (irreversible). La última constituye una depresión pequeña, progresiva, de la presa en el material subyacente y no existe en las presas relativamente viejas, en las cuales ya está completada esta pequeña cantidad de hundimiento.

El problema de asentamiento es simple si la roca de cimentación es firme y fuerte, tal como el granito sólo ligeramente fracturado y agrietado. Tratando con tipos de roca más débiles, especialmente las de carácter arcilloso, tales como esquistos blandos, arcillas o limolitas, llega a ser crítico el problema de la deformación bajo cargas pesadas. El asentamiento de una presa puede aumentarse por la presencia o formación de cavidades bajo la estructura existente; por ejemplo, por eliminación de las capas de yeso y sal por disolución.

Cuando se elimina una parte de la carga que actúa sobre la roca bajo la presa, ésta se levantará ligeramente. Esta acción hacia arriba se llama recuperación elástica o simplemente "recuperación".

Particular atención en el estudio del asentamiento y recuperación merecen las dificultades encontradas cuando la presa se emplaza sobre diferentes ti-

pos de roca. Si una parte de los cimientos tuviera que descansar sobre arenisca dura y otra parte sobre lutita blanda, podrán esperarse asentamiento y recuperación diferenciales. Las tensiones internas así impuestas sobre la estructura podrían ser desastrosas si no se tienen en cuenta en el proyecto. Si la presa no se puede situar sobre un único tipo de roca, los proyectistas deberán vigilar las posibles variaciones en los módulos de elasticidad.

Problema del embalse: Escape y filtración.

Cuando se detiene el agua por medio de una membrana, tal como una presa, hay una masa de agua del depósito que escapa por debajo y alrededor de la membrana, en los bordes. Este fenómeno normal se llama escape, que es preciso distinguirlo de la filtración. Esta última es un escape de agua anormalmente grande desde el depósito a través de fisuras y aberturas de la roca.

Es corriente encontrar canales "enterrados" (cauces fósiles) en el borde del depósito. Dichos canales son superficies profundamente erosionadas en la roca que deben su origen a antiguas corrientes que fueron llenadas con lo que puede ser un material altamente impermeable.

La filtración puede deberse a la solubilidad del cimiento de la presa o del material del embalse, tal como caliza, yeso o roca salina. Estas rocas se distinguen especialmente por su solubilidad cuando están mucho tiempo bajo la acción del agua, particularmente si ésta contiene dióxido de carbono. Si tal acción disolvente aparece antes de la construcción del depósito (que es el caso general), acaba en la formación de cavernas, canales subterráneos y fisuras extensas interconectadas en la roca. Muy a menudo, la presencia de canales

abiertos subterráneos no se aprecia a primera vista en la superficie y a veces no se puede investigar taladrando en el emplazamiento de la presa. Además, las aberturas pueden cerrarse con arcilla o materiales impermeables semejantes, pero solubles. Sin embargo, una vez lleno el embalse, los materiales arcillosos son gradualmente lavados (eliminados), y, como consecuencia, el depósito no podrá contener agua. Los diversos métodos usados para cerrar dichas aberturas no suelen ser económicos, a menos que las rocas defectuosas estén debajo del cuerpo de la presa (y no del depósito) y tengan un espesor razonable o estén limitadas por rocas impermeables en ambos lados de la cuenca del depósito. Entre los métodos más eficientes se incluye el inyectado [redacted].

Las rocas no solubles, tales como el granito o areniscas, corrientemente no presentan serios problemas de filtración a menos que se hallen muy fisuradas. Las rocas ígneas o metamórficas que están muy rotas, intensamente agrietadas o muy falladas, deben investigarse muy de cerca con respecto a sus características de filtración. Dichas investigaciones incluirán ensayos de presión en perforaciones para determinar las pérdidas de agua, y excavación de galerías o pozos para observar directamente las fisuras características de la roca. Afortunadamente, dichas rocas, corrientemente, pueden sanearse por inyección sin grandes dificultades. Algunas de las rocas de esta categoría pueden abarcar areniscas que tengan una estructura muy permeable.

Una roca de gran importancia cuando se encuentra en un posible embalse es el basalto, incluyendo las dos variedades de colores brillantes y oscuros (y las coladas de lava). A causa del rápido enfriamiento de estas rocas durante su formación, presentan extensas grietas y fracturas, que raramente se taponan

con materiales residuales. Los túneles naturales en los basaltos pueden tener kilómetros de longitud y hasta 9 m ó más de diámetro. Una de las más grandes dificultades en el análisis de las propiedades de filtración de un embalse que se proyecta en basalto es que los ensayos de agua a presión en perforaciones pueden dar resultados completamente equivocados. A causa de esta incertidumbre, la inyección de dichos materiales puede llegar a ser muy difícil y necesita gran número de barrenos para realizarla.

Problemas de estribos.

El material de cimentación deberá ser resistente a la desintegración y a la erosión. Esta consideración obvia no sera recalcada nunca en exceso tratándose de los estribos, particularmente si existen rocas arcillosas y conglomerados. Los estribos construidos sobre tales materiales, si se secan durante largos períodos de exposición al aire, como en regiones áridas y semiáridas, y luego se saturan por el agua del embalse, pueden poner en peligro la estabilidad de la presa. Para evitar el peligro, se recomienda la eliminación de la roca firme donde la humedad nunca se seca completamente. Y las superficies obtenidas deberán protegerse hasta que se eche el concreto. Esta protección puede llevarse a cabo por muchos métodos, como la pulverización con gunita, o usando emulsión de asfalto, o dejando en el lugar una capa protectora de roca (espesor de 6 a 12 pulgadas) que se retira inmediatamente antes de echar el concreto.

La inestabilidad de las laderas del valle donde tengan que construirse los estribos puede constituir otra dificultad. Tal es el caso de rocas de pobre resistencia al cortante, como, por ejemplo, algunas pizarras.

Algunas veces el buzamiento de las capas o las juntas es suficiente para producir que toda la losa rocosa del estribo sea inestable cuando se excava, especialmente si se socava, aunque sea ligeramente. Dichas rocas tendrán que eliminarse o, como se hace algunas veces, anclarse a la roca estable subyacente. Puede conseguirse un buen resultado perforando agujeros a través de las losas sueltas dentro de los estratos subyacentes y encajando anclaje de acero dentro de los agujeros.

Estribos de presa de arco.

Los problemas de estribo en presas de arco son de una importancia particular. La roca que tiene que aguantar el empuje del arco deberá ser lo bastante fuerte para resistir la presión sin ser aplastada y deberá estar libre del desgaste por meteorización, alteraciones, producción de fallas y estratificaciones críticas. Debe ser capaz de resistir la acción de las fuerzas de cizalla, que inevitablemente se desarrollan en la roca, en conjunción con la presión. Las rocas intersectadas por juntas y fallas pueden ceder fácilmente bajo los esfuerzos constantes. En relación con esto, la presencia de juntas y fisuras aproximadamente paralelas a la dirección del empuje puede ser peligrosa.

Problemas de la sección del canal.

El problema común en la sección del cauce o canal en el emplazamiento es determinar la profundidad del material no apropiado, para eliminarlo (Fig. 86) Esto se hace corrientemente por perforación exploratoria, algunas veces combinada con métodos geofísicos. Sin embargo, estos últimos tienen que emplearse con mucha precaución si se sospecha que el relleno del canal contiene numerosos canales fósiles grandes, entrecruzados o estrechos, o gargantas o pozos fósiles. La

existencia de gargantas estrechas no puede descubrirse ni aun con agujeros perforadores.

En un valle de río siempre se sospechará que oculte una falla. Corrientemente, cuando un río tiende a seguir su camino a través de una cadena montañosa, a menudo se ve que el material blando de una zona de falla proporciona el camino más sencillo. Si el tipo de roca sobre un estribo de una presa propuesta es considerablemente diferente de la roca sobre el otro estribo (Fig. 87a), es posible que la razón esté en una falla existente en el centro del valle. Sin embargo, pueden ocurrir situaciones similares a causa de las intrusiones ígneas en las capas metamórficas o sedimentarias. La zona de contacto de tales intrusiones deberá examinarse por medio de perforaciones. Muy a menudo esta zona de contacto contiene material blando, muy alterado, no apropiado para cimientos de presa y muy permeable. Los cambios abruptos en el buzamiento (Fig. 87b) de los estratos de un lado del valle al otro pueden indicar una falla. Es imposible enumerar dichas anomalías geológicas tan comunes, pero deberá investigarse cuidadosamente cualquier cambio anormal en el buzamiento o rumbo o en el tipo de roca de uno y otro estribos de la presa. Para localiza las fallas o las zonas de contacto bajo el lecho de un río, el método más efectivo es la perforación de agujeros en ángulo oblicuo (Fig. 86). En valles de ríos estrechos, esto evitará perforar desde la superficie del agua con la ayuda de barcazas o puentes. Para ríos anchos quizá haya necesidad de recurrir a la perforación con barcazas.

IX-4.- TRABAJO DE CIMENTACION: CEMENTACION

Preparación de los cimientos.

Si es económicamente factible, debe eliminarse todo material existente ba

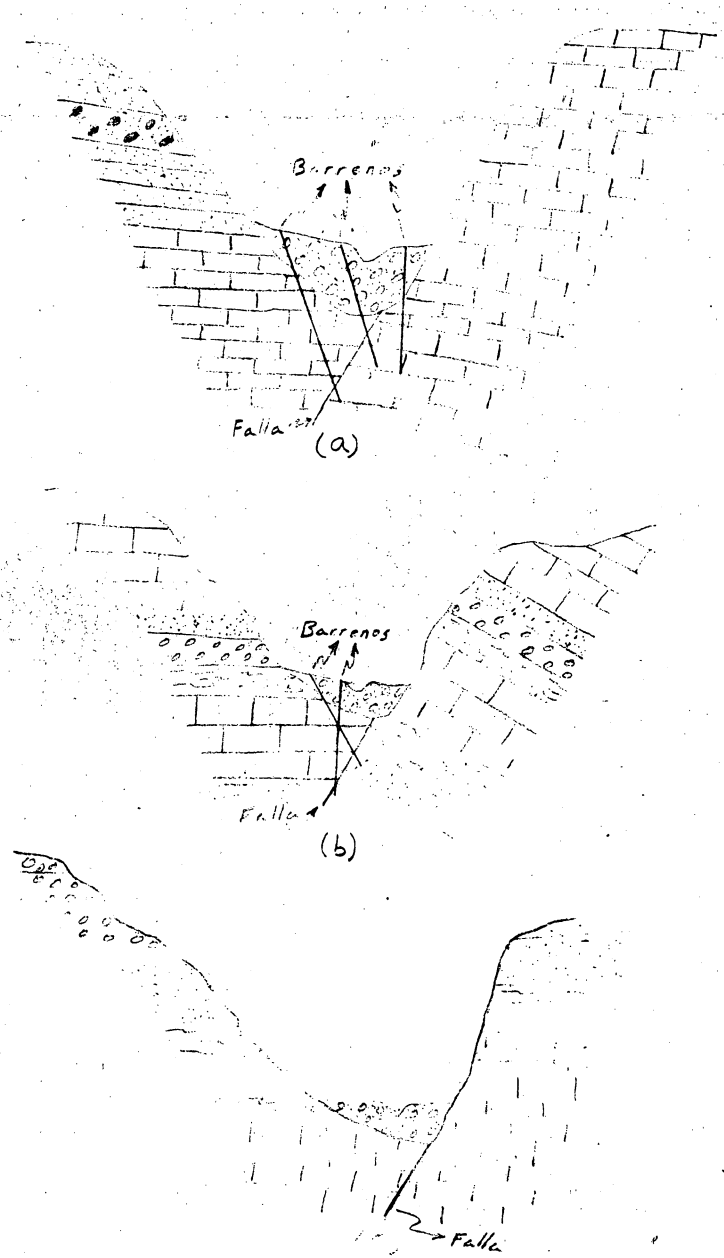


Fig. 87

de escape para reducir el levantamiento, y 2) consolidar suficientemente la roca para obligarla a actuar como un monolito bajo la estructura. El carácter geológico de la roca es de una importancia primordial para establecer la necesidad de cementarla y para establecer el método que se haya de emplear. La mezcla de cementación puede inyectarse a través de agujeros perforados especialmente para este fin desde la superficie de cimentación, y pueden construirse túneles bajo los cimientos o los estribos con el fin primario de inyectar estas áreas más eficazmente, los agujeros de inyección pueden perforarse desde las galerías dentro de la presa después de su construcción, o el cemento puede inyectarse en tubos que se dejan a través del cuerpo principal de la presa para este fin. A continuación sólo se tratará la inyección de cimientos.

Materiales para cementar.

El tipo más común es una mezcla de cemento portland y agua, en ocasiones se usa una combinación de cemento, arena y agua. La distancia que puede alcanzar la mezcla de cemento a través de las grietas depende de su viscosidad o espesor. El último varía según el tamaño de las grietas; comúnmente al principio de las operaciones se necesita hacer algún experimento para determinar la mezcla apropiada. Cuanto más anchas son las grietas, puede usarse una mezcla más viscosa. En vez de usar la inyección de cemento, se puede ver que es más eficaz en ciertas condiciones cementar con una mezcla de cemento y polvo de roca, cemento y caliza hidratada, cemento y cloruro de calcio, tierra de diatomeas y cemento, cemento y lumnita (para fraguado rápido), cemento y arcilla o cemento y bentonita. Algunas de estas sustancias pueden emplearse sin cemento. También se utilizan varias combinaciones de ellas. Las emulsiones de asfalto y otros

compuestos bituminosos se han empleado eficazmente para cementación. En algunos casos (por ejemplo, donde se encuentran grandes corrientes de agua) la paja o el heno puede introducirse en un gran agujero y puede saturarse con una emulsión de asfalto. La paja retrasa lo suficientemente la cementación para permitir que se ajuste antes que el agua se la lleve. También se usan varios productos químicos para el inyectado con diferentes grados de éxito. La elección de un material de inyección depende de su coste, utilidad y eficacia bajo condiciones dadas.

Cementación a baja presión.

Primariamente hay dos tipo de inyección: la cementación a baja presión o somera, y la cementación a alta presión o profunda. Los términos de presión "baja" y "alta" son sólo relativos (Fig. 88).

La cementación a baja presión precede a la cementación a alta presión y corrientemente se hace antes de colocar nada concreto en el cuerpo de la presa Su fin primordial es consolidar la roca y taponar todas las grietas mayores y aberturas. Otro fin es crear una losa fuerte monolítica en el área del talón de la presa para resistir las presiones altas que se desarrollarán en dicha área durante el segundo estadio del programa de cementación. Estas presiones altas tenderán a levantar y aun destruir la roca en el área del talón del cimiento de la presa. La cementación de presión baja deberá extenderse a lo largo de todos los cimientos si el estado de la roca lo exige así.

Los agujeros en el estadio de inyección de presión baja son de una profundidad de 6 a 15 m.

Los agujeros se perforan verticalmente, a menos que se pueda conseguir -

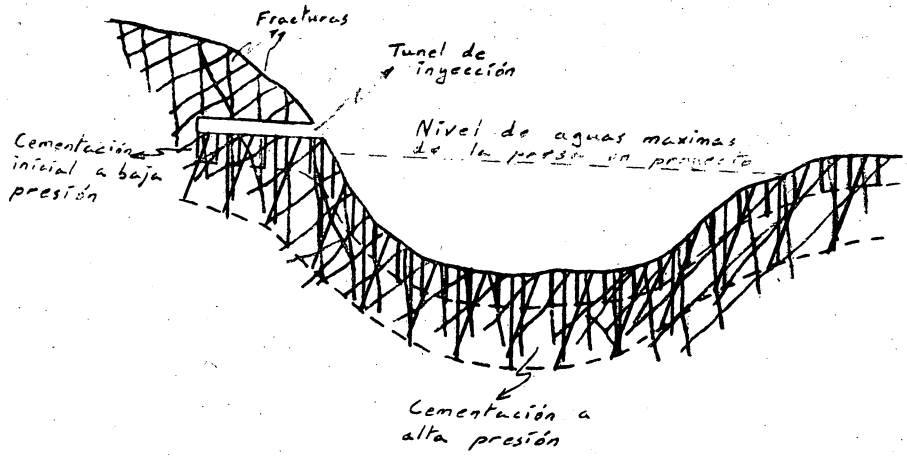


Fig. 88. Patrón de cementación

mejor contacto con las grietas usando taladros oblicuos. Las presiones no deberán ser tan grandes que levanten la roca superior o destruyan la fricción y la cohesión que mantiene juntos los estratos, deterioro que no puede compensarse por la cementación. Para observar el posible levantamiento, deberán usarse métodos seguros de registro. En realidad, el levantamiento puede ser bastante imperceptible hasta que se suelte un bloque grande de roca y resbale dentro de la excavación (como ocurre a veces cuando se cementa el área del estribo).

Cementación a alta presión.

El objetivo de la cementación a alta presión es crear una cortina profunda en el talón de la presa, lo cual evitará filtraciones del embalse y el levantamiento de aquella por la presión del agua producida por el alto nivel del agua en el embalse. Este tipo de cementación se hace después de completarse la inyección a baja presión y se haya colocado parte de la estructura de concreto. El peso del concreto, junto con la losa en el talón de la presa, soportará los efectos de las presiones altas de la inyección. La perforación se hace desde galerías dentro de la presa o desde tubos proyectados a través del talón de la presa, y por eso la perforación debe realizarse antes de que empiece el embalse a almacenar agua. Corrientemente, los taladros se colocan en una hilera única sobre centros a, aproximadamente 1.52 m. Los agujeros son verticales u oblicuos; su inclinación está gobernada por el buzamiento de las junturas visibles o de las grietas en la roca de cimentación. Corrientemente los agujeros oblicuos se hacen formando un ángulo de 10 a 15° con la vertical.

IX-5.- INVESTIGACIONES GEOLOGICAS PARA UNA PRESA DE ALBAÑILERIA

Criterios de selección del lugar.

Del análisis de los problemas, roturas y contingencias a que se ve sometida una presa expuestos en el presente capítulo se puede llegar a la conclusión de que el emplazamiento para una presa deberá satisfacer las siguientes exigencias:

1.- La roca deberá ser firme y resistente para las posibles fuerzas estáticas y dinámicas, incluyendo los temblores de tierra.

2.- Las vertientes del valle serán estables cuando se llene el embalse; este requisito tiene también vigencia respecto de los estribos.

3.- La cimentación de la presa deberá estar libre de deslizamiento, especialmente en el caso de presa de gravedad.

4.- La roca de cimentación deberá ser en lo posible de un solo tipo geológico, para evitar variaciones en el valor del módulo de elasticidad.

5.- Los muros de cimentación y del embalse deben ser impermeables. Se establecerán medidas de remedio para cada lugar proyectado y compararlas entre sí. También deberá pensarse que en el caso de presas de regulación de corriente se podrán permitir pérdidas considerables de agua, dado que no se afecta la estabilidad de la presa.

6.- Las rocas deben ser resistentes a la solución, erosión, descomposición y otros afectos perjudiciales de humedad y secado, hielos y deshielos.

7.- El área de descarga del embalse, incluyendo las rocas y la sobrecarga, deberá ser resistente a la erosión y, por consiguiente, no contribuir fácilmente a las acumulaciones de fango que tanto disminuyen la vida del embalse.

8.- En el caso de una presa de arco, la topografía y la fisionomía - estructurales de la roca en los estribos tienen que ser favorables para la acomodación de los empujes y la estabilidad del arco.

9.- Las condiciones geológicas y topográficas permitirán emplazamiento adecuado de: a) vertedor y túnel de desviación y b) sala de máquinas y canales de conducción, si los hubiere.

10.- Los emplazamientos de los materiales de construcción, principalmente agregados de concreto, habrán de estar a unas distancias que no resulten antieconómicas.

La elección final del lugar de la presa se basa en el análisis comparativo de todos los datos expuesto, siendo los criterios de comparación el coste y la utilidad.

Reconocimiento.

Antes de empezar las investigaciones sobre el terreno ha de hacerse un estudio completo de toda la literatura geológica correspondiente a la comarca. Se consultarán las publicaciones de los organismos competentes (particularmente aquellas que se relacionan con las características del suelo que privan en el - lugar) y también los informes geológicos del estado y del municipio.

Debe obtenerse una información adicional haciendo personalmente excursiones de reconocimiento al lugar elegido y también con fotografías aéreas.

Si el reconocimiento da resultados positivos respecto de la utilidad del lugar, se prosiguen las exploraciones; si no, se busca otro emplazamiento.

Investigaciones preliminares.

Al llegar a este nivel, deberá estar claro para los investigadores el -

cuadro general de la geología regional. Con este fin deberá investigarse - completamente una área suficientemente grande en ambos lados del lugar proyectado. Deberá prepararse el mapa geológico del área y abarcar todas las - fisionomías geológicas que puedan significar algo para el proyecto. Simultáneamente se localizan las fuentes de materiales de construcción, brevemente - explorados, y se señalan en el mapa. Para una presa de albañilería, suelen - ser agregados de concreto. Se reúnen muestras de rocas y materiales de construcción para futuras referencias y, en algunos casos, para ensayos de laboratorio. Deberán quedar claras las posibilidades de filtraciones del embalse (por lo menos, en términos generales) y se harán planes para ulteriores investigaciones de filtración.

Se establece un control de reconocimiento vertical y horizontal. Esto es necesario para la preparación del mapa topográfico del lugar de la presa - (a escala grande) y de la cuenca del embalse (a escala más pequeña). Todos los datos reunidos deberán guardarse en un archivo. Este archivo se usa como guía en futuras exploraciones por métodos directos o indirectos.

Exploraciones detalladas.

Corrientemente, cuando se llega a este grado, se han preparado los proyectos aproximados de la presa y sobre la base de estos proyectos se esboza - un programa exploratorio. Como este programa se confecciona sobre el terreno, sus resultados se comunican al equipo proyectista. En justa correspondencia, el proyecto puede cambiarse y estos cambios pueden terminar en la modificación del programa exploratorio. Esta interdependencia del proyecto y de - las investigaciones geotécnicas del campo durante el grado de exploración deberán considerarse especialmente como un camino eficaz para obtener una pre

sa racionalmente planeada y construida.

El problema básico de campo durante este grado es determinar con detalle el carácter de la sobrecarga y el lecho de la roca sobre los estribos y en el tramo del río correspondiente a la presa. Se investigan completamente las zonas de filtración del futuro embalse. Se establecen pozos de observación del agua subterránea y, si es necesario, se hacen ensayos de bombeo.

Durante este período se concede seria importancia al emplazamiento exacto del eje de la presa y al tipo de presa, como influidos que están por las condiciones geológicas. Si una falla grande atraviesa el emplazamiento de la presa, puede evitarse trasladándolo aguas arriba. El peligro de deslizamiento en un estribo puede remediarse desviando el eje. Una zona de caliza extensa pude poner en duda la posibilidad de llevar a cabo el proyecto. Las condiciones de la roca pueden ser favorables para una presa de gravedad o de tierra, en vez de para una presa de arco. Si hay poco agregado de concreto, pero cantidades grandes de materiales de terraplén, puede estimarse que es que es más económico construir una presa de tierra que una presa de concreto.

Cuando se da fin a esta fase de la exploración, se prepara otro informe geológico. Se facilitarán la mejor interpretación de las condiciones geológicas basadas en el trabajo subterráneo y los resultados de los estudios de las fuentes de material de construcción.

Perforación.

La mayoría de la información geológica detallada durante el período de exploración de las investigaciones se obtiene de la perforación.

Además de los sondeos de perforación, se pueden taladrar pozos. Las

galerias exploratorias (es decir, túneles con pisos aproximadamente horizontales y una sección transversal pequeña), pueden llevarse dentro de los estribos si la presa es de tamaño mayor o si por dichas galerias pueden solucionarse problemas geológicos anormales. Las fuentes de materiales de construcción se investigan por agujeros de barreno someros o pozos de ensayo, y se extraen muestras para los ensayos de laboratorio.

IX-6.- PRESAS DE TIERRA

Criterios del proyecto.

Básicamente una presa de tierra es un dique o terraplén trapezoidal construido en un valle para formar un depósito de agua. Tiene que ser lo bastante impermeable para evitar la pérdida excesiva de agua del embalse. El proyecto también tiene que asegurar frentes de la presa estables. El asentamiento de la cresta de la presa una vez construida no deberá ser tan grande como para reducir el desnivel cresta-agua embalsada hasta un punto peligroso. La vertiente aguas arriba de la presa deberá protegerse de la acción destructora de las olas y la vertiente aguas abajo deberá resistir la erosión de la lluvia. Habrá una ligazón suficiente entre el dique y sus cimientos para evitar, en lo posible, el desarrollo de caminos de escape perjudiciales; el levantamiento hidrostático excesivo deberá combatirse con un desagüe adecuado.

Donde puede encontrarse a mano material térreo es preferible una presa de tierra a una de concreto. De hecho, aun las presas de tierra altas pueden construirse sobre cimientos de tierra o sobre cimientos de roca pobre, cimentación prácticamente imposible para una presa de concreto alta.

Corrientemente es más económico construir una presa de tierra que una de concreto para cerrar un valle amplio. La ancha cresta de una presa de tierra sirve perfectamente para una carretera, donde sea necesario trazar vías a través del valle. Las presas de tierra son apropiadas en climas fríos, a causa de su resistencia a los efectos perjudiciales de las heladas. La construcción de una presa de tierra puede ser, sin embargo, muy cara si la gran base de la presa necesita largos canales de desviación o conductos para que transcurra el río durante la construcción.

La permeabilidad del terraplén puede combatirse por distintos medios.

La pantalla más usada es un centro de tierra impermeable construido de materiales compactados o cementados de grano fino y de baja permeabilidad.

Tipos de presas de tierra.

Las presas de tierra se clasifican según su método de construcción. En una presa de terraplén hidráulico el material del banco se transporta y se coloca en el terraplén por medio del agua. En una presa de terraplén semihidráulico el material se excava y se transporta al emplazamiento de la presa por medios mecánicos y se coloca en el terraplén con chorros de agua. La presa de terraplén apisonado se construye con equipo de compactación y el material térreo lo acarrean máquinas movedoras de tierra.

Las presas de tierra también se pueden clasificar según las características del terraplén. Un terraplén de tierra puede ser graduado u homogéneo. Un terraplén puede construirse exclusivamente partiendo de roca. Una presa graduada es una presa de terraplén apisonado compuesta de varias capas, o

zonas, de permeabilidad creciente desde el centro hacia las vertientes exteriores (Fig. 89). El material del centro y de las zonas se coloca y se apisona simultáneamente por los métodos de compactación normales.

El número de zonas depende de la disponibilidad y tipo de la cantera de aprovisionamiento. Las zonas se numeran por símbolos 1, 2 y 3, y cuanto mayor es el número de la zona mayor es su permeabilidad. Si sólo hay un tipo de material de aprovisionamiento, se construye un terraplén homogéneo. Una presa con relleno de roca se construye con roca basta y se provee con material impermeable en su cara aguas arriba, o bien se construye con un centro o núcleo impermeable, o cualquier otra solución parecida.

Protección de las caras.

Normalmente las olas en el embalse se producen por la acción del viento y, excepcionalmente, por temblores de tierra o deslizamientos masivos de las márgenes del embalse. La cara aguas arriba de una presa se protege contra la acción de las olas con cascajo, una capa de roca triturada de tamaños determinados soportada por grava también de tamaño conveniente. La grava impide que la tierra menuda del núcleo del dique sea arrastrada a través del enrocamiento por las olas y también evita el que se hundan ~~con~~ en el núcleo los bloques gruesos de roca.

Proyecto de las caras.

Para mantener una presión vertical uniforme en todos los puntos de una presa de tierra, sus caras se hacen más tendidas gradualmente desde la cresta al pie. Por ello, generalmente, las pendientes mayores de las caras

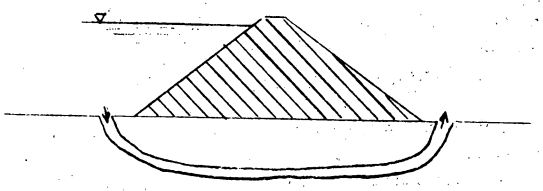
están en la cresta de la presa.

Cuanto menor sea el tamaño de las partículas de la tierra que se emplea en el terraplén, mas tendidas han de ser sus caras. Así, un dique homogéneo de tierra de tamaños 0,1 ÷ 0,01 mm (limo) tiene pendientes tan tendidas como 4:1 bajo el nivel máximo de agua (línea de agua). Si predominan las arcillas (que son aún más finas) se construyen presas de pendientes de hasta 10:1 cerca de la base. Los ángulos de la pendiente de las caras de una presa dependen también de la compacidad de los cimientos subyacentes. Cuanto menos compactos sean, más tendidas son las caras. De este modo, el peso total del dique se distribuye más ampliamente sobre los materiales blandos de abajo; ello reduce el asentamiento de los cimientos y el peligro de un deslizamiento de los mismos.

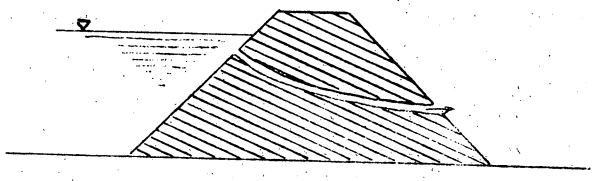
Formación de canales y escape.

Se llama formación de canales a la erosión interna de los cimientos o del dique producida por el escape (infiltración). La erosión comienza en la línea de base aguas abajo y va remontándose hacia el embalse, formando "canales" o tubos bajo la presa (Fig. 89). Los conductos siguen las zonas de máxima permeabilidad y no se desarrollan hasta varios años después de la construcción. El agua surge primero como una pequeña fuente que va aumentando paulatinamente de tamaño, y en el momento en que aparece agua turbia (enfangada) en el pie puede producirse una rotura en horas tan sólo.

La resistencia del terraplén o su fundación al escape depende de la plasticidad del suelo, del tamaño de sus partículas y del grado de compacidad. La resistencia mínima al escape se encuentra en: 1) materiales poco compactos sin prácticamente nada de cohesión, aunque están bien graduados en tamaños, y 2)



a) Tubificación a través de los cimientos



b) Tubificación a través de la presa

Fig. 89.

en arenas uniformes y finas, sin cohesión, incluso bien atacada. Las grietas de asentamiento pueden producir escapes hasta en materiales resistentes.

Medidas contra la formación de canales.

La formación de canales puede evitarse alargando el camino de filtración del agua dentro de la presa y sus cimientos. Esto, por otra parte, disminuye el gradiente hidráulico del flujo del agua y, por tanto, su velocidad. El camino de filtración puede aumentarse por muros de retención, centros impermeables y mantas impermeables que se extiendan aguas arriba sobre la cara frontal (Fig. 99) y ensanchando la base de la presa, particularmente donde escasean los materiales de revestimiento.

Presas de terraplén de roca.

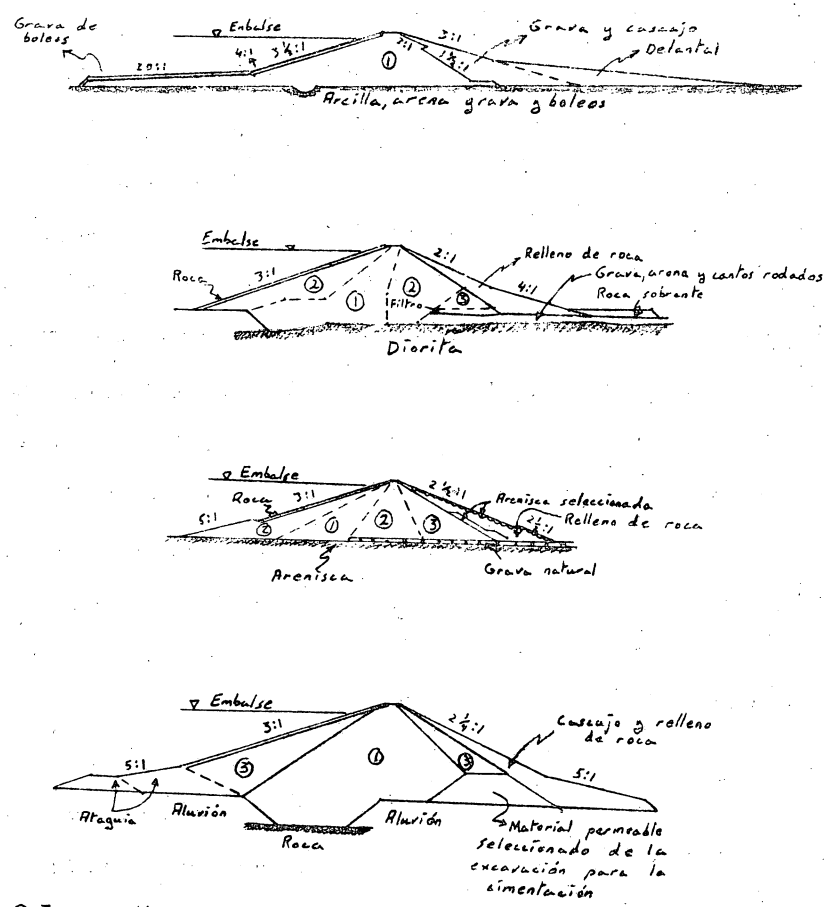
Todas las presas de relleno de roca construidas antes de 1942 y la mayoría de las construidas desde entonces se componen de tres elementos básicos (Fig. 90) 1) terraplén de roca suelta, que constituye la mayor parte de la presa y resiste el empuje del embalse; 2) un revestimiento impermeable de la vertiente frontal, 3) cascajo entre 1) y 2) que actúan como una almohadilla para la membrana y resisten las desviaciones destructoras. Las presas mixtas se forman remplazando alguno de estos elementos por otros que tengan una composición equivalente. Por ejemplo, la almohadilla de cascajo se puede remplazar con un filtro con graduación de tamaños, y el revestimiento impermeable puede sustituirse con un núcleo impermeable.

Las presas de terraplén rocoso pueden ser económicas en lugares donde: 1) el concreto sea caro; 2) falten los materials de tierra suficientes y adecuados

para un terraplén apisonado o para un terraplén hidráulico; 3) los cimientos no son apropiados para una presa de albañilería; 4) es provechoso utilizar roca de calidad buena en cantidad suficiente; 5) los hielos o el subsuelo helado permanentemente harían muy costosa la excavación de materiales para terraplén apisonado o hidráulico, o 6) donde haya una posibilidad de sismos. Precisamente al gran número de terremotos registrados en California se debe, al menos parcialmente, que haya en aquel estado la mayor concentración del mundo de presas de relleno de rocas: 25.

El terraplén rocoso que forma la parte principal de la presa deberá ser de roca firme. No deberán usarse rocas que se mojan o que se desgastan considerablemente por la meteorización, tal como el esquisto. Esta roca no deberá usarse a causa de que se desmenuza por la voladura o durante el proceso de transporte.

La desventaja de un revestimiento impermeable artificial, tal como un revestimiento de concreto, es su rigidez relativa. La consolidación de la masa principal de roca puede hacer que se despegue del revestimiento. Las grietas resultantes pueden producir graves filtraciones. Una reconocida ventaja de los terraplenes rocosos revestidos de un material impermeable es su facultad para soportar la sobrecarga debida a una corriente inesperada durante la construcción o después. En algunas presas construidas desde 1942 se empleaba un núcleo de tierra impermeable de flancos apisonados (Fig. 90). Esta construcción posee la ventaja de tener un centro flexible, que no se resquebraja a pesar de un asentamiento continuo de los cimientos y del terraplén. Tampoco el núcleo de tierra impermeable se desintegra ni necesita reparaciones, como ocurre con las presas



① Impermeable, arcilla o arcilla arena y grava compactadas con rodillo
② Material semipermeable de estabilidad y tamaño graduado apisonado con rodillo.
③ Material permeable de arena seleccionada o arena grava y boleo, apisonado si es necesario.

Fig. 90. Tipos de presas de tierra.

revestidas de acero u concreto. Una presa así construida se parece a una presa natural formada en un antiguo río por medio de una morrena terminal. Dichas presas naturales generalmente se componen de grava basta que se va haciendo gradualmente más fina y en dirección de aguas arriba y queda trabada en la superficie por medio de un conglomerado glacial de cantos gruesos muy bien cementados por arcilla fina.

IX - 7.- EMBALSES.

Embalses y cuencas de recepcion.

La función de las presas puede variar desde la de mantener el nivel del agua unos pocos metros por encima del normal, por medio de una esclusa de regulación, hasta la creación de un gran lago. La presa ocupa casi siempre una pequeñísima parte de la periferia del embalse, cuyo fondo y la mayor parte de sus orillas (si puede hacerse esta distinción) están limitadas por la superficie del terreno. Los problemas creados en el emplazamiento de la presa son comunes a todo el embalse, aunque en grado variable. Resumiendo, se producirá una diferencia en los niveles del agua subterránea, entre las dos caras de la presa, que corresponde a la altura de la misma; las capas del lecho del embalse, en especial las próximas a la presa, quedarán sujetas a una fuerte presión hidráulica; todas las áreas inundadas estarán afectadas por la presencia de agua sobre ellas; por último, el nivel del agua subterránea, valle arriba de la presa, sufrirá el efecto de la subida del nivel del agua en la superficie hasta gran distancia de las orillas del embalse. En consecuencia, el agua embalsada tiende a buscar un medio de escape a través de cualquier punto débil que pueda existir

en la estructura del terreno. Los terrenos situados dentro de la esfera de influencia del agua embalsada, que estén expuestos a su acción directa, pueden perder su estabilidad y, como consecuencia, producirse corrimientos del terreno. También serán afectados los pozos situados en esa zona de influencia del embalse. Una breve consideración bastará para comprender que todos estos fenómenos dependen fundamentalmente de la estructura geológica de la cuenca del embalse. De ahí que el estudio geológico sea un complemento esencial de los llevados a cabo con motivo de la construcción de la presa, ya que sólo con su ayuda pueden preverse los posibles peligros y tomar por anticipado las precauciones convenientes.

Filtraciones en los embalses.

Es evidente que las filtraciones en los embalses son una fuente potencial de dificultades. Aunque parezca sorprendente, no siempre se ha prestado atención a la posibilidad de su aparición.

El que algunas estructuras de gran magnitud tengan que abandonarse, no por defectos del proyecto o de construcción, sino por no haber determinado la naturaleza geológica local, es la más clara evidencia de la necesidad de un estudio de la cuenca del futuro embalse.

Una filtración excesiva puede obedecer a defectos en la disposición estructural del subsuelo como, por ejemplo, una falla o una excesiva fracturación; por la incapacidad de uno o más tipos de roca para resistir al contacto con el agua; como resultado del buzamiento de los estratos permeables que permitan el desagüe del embalse; o por la ausencia de unas adecuadas barreras impermeables en los puntos críticos del perímetro topográfico del embalse.

Como, por lo general, la presa suelo colocarse en la parte más profunda del valle utilizado como embalse, en ese lugar el nivel piezométrico será mayor y, por tanto, mayor el peligro que representa la existencia de cualquier defecto estructural geológico o de rocas que puedan alterarse por un prolongado contacto con el agua. Esto es especialmente cierto cuando se trata de rocas solubles en el agua en mayor o menor grado. La sal gema es, naturalmente, la más peligrosa, pero como no es frecuente, no hay que considerarla en general. El yeso, aunque menos soluble, es seriamente afectado por el agua y resulta potencialmente peligroso. De importancia excepcional en todos los estudios de embalses es la existencia de calizas, porque aunque son las menos permeables de las rocas mencionadas, su relativa abundancia las hace comparativamente bien conocidas, por lo que esta familiaridad puede conducir a la tendencia a formar falsos juicios sobre su compacidad, sobre todo cuando sólo se considera el aspecto relativamente sólido de muchos afloramientos.

Todas las calizas son, al menos parcialmente, solubles en el agua. Si a causa del movimiento de ésta, las disoluciones resultantes en contacto con la roca son reemplazadas por agua sin contaminar, continuará el proceso de disolución; por lo tanto, en todas las formaciones calcáreas en donde haya agua subterránea en movimiento habrá que tomar precauciones especiales para asegurarse de que no existen zonas débiles. Efecto de la acción del agua son las conocidas cavernas que abundan en las comarcas clacáreas; algunas veces están producidas por corrientes superficiales, que en algunas partes de su curso se hacen subterráneas; así ocurre en ciertas comarcas, donde los paisajes compuestos de cavernas son típicos.

Investigación de las filtraciones.

Las filtraciones en embalses suelen ser tan manifiestas que no son precisas ayudas especiales para encontrarlas. Los súbitos aumentos de la corriente aguas abajo de una presa, sin el correspondiente aumento de lluvias, son una indicación directa de algún escape de agua; y la aparición de manantiales, u otros indicios superficiales en parajes antes secos y estables son también indicaciones apreciables. Las filtraciones pequeñas pueden ser más difíciles de localizar, sobre todo en relación con canales de disolución en calizas. En estos casos puede ser muy útil el empleo de colorantes, añadiendo unas cantidades mínimas al agua en un punto conveniente y tomando muestras en los lugares donde se sospecha que se produce la filtración. Con este propósito se han empleado diversas sustancias químicas, de las que tal vez la más común es el permanganato de potasio; en algunos casos se ha utilizado el añil corriente. También se ha sugerido el empleo de bacterias, pero lo normal es utilizar sustancias químicas, entre las cuales se cuentan la fluoresceína y su sal sódica, la uranina; estas sustancias dan al agua un color característico que es detectable aun cuando estén diluidas en la proporción de una parte en más de 10 millones de partes de agua.

Pero aun con el uso de estos colorantes hay veces en que no puede encontrarse el lugar de las filtraciones.

Otra de las aplicaciones pacíficas de la energía atómica está colocando en las manos de los geólogos e ingenieros un nuevo instrumento de grandes posibilidades para la detección de las corrientes subterráneas. El uso de isótopos radiactivos es una aplicación evidente de esta rama de la química moderna. Existen diversos inconvenientes para su total adopción: La posibilidad de reacciones

químicas con las capas acuíferas, su coste relativamente alto, los peligros biológicos y de radiaciones y las diferentes vidas medias de los distintos isótopos. Existen cierto número de isótopos que no presentan estos inconvenientes y que, por tanto, son admirablemente adecuados para la determinación del movimiento del agua en el subsuelo.

Naturalmente, se ha de analizar minuciosamente el agua natural antes de introducir el material radiactivo. Se ha encontrado que la técnica de utilización de un solo pozo es razonablemente efectiva y económica, aunque los resultados así obtenidos deben interpretarse con cuidado si la capa acuífera que se estudia es muy extensa. Deben aún emplearse expertos para la utilización de materiales radiactivos, pero es un método muy prometedor para ampliar grandemente las investigaciones del agua en el subsuelo.

Prevención y eliminación de las filtraciones.

Si se aplican las investigaciones geológicas preliminares al estudio de los embalses y cuencas de recepción cuando se proyecta la construcción de una presa, deben descubrirse normalmente la mayoría de las posibles causas de filtración. Una vez encontrada la naturaleza de las filtraciones, aquélla determinará si es posible o no prevenirlas y evitarlas. En el caso de estratos que bucen desde el valle a los territorios adyacentes, poco o nada puede hacerse para intervenir en la marcha natural del agua subterránea.

En otros casos, en especial cuando se localiza una zona agrietada en la roca, la cementación puede impermeabilizarla con efectividad si se lleva a cabo en íntima asociacón con el estudio geológico. También pueden emplearse las cementaciones como obra de reparación si las filtraciones se presentan des—

pués de construida la presa y de haber empezado la acumulación de agua en el embalse. Como es muy raro que un embalse se vacíe completamente, o - aun parcialmente, como no sea durante un período muy breve, una vez que se ha puesto en servicio activo, es con frecuencia un asunto muy difícil el - efectuar obras de reparación para suprimir filtraciones en un embalse total o parcialmente lleno. Otro método para reducir e incluso suprimir las filtraciones es el empleo de material naturalmente impermeable, como la arcilla y el limo que contenga el agua que alimenta el embalse, para cerrar las aberturas de aquél cuando éstas son definidas y no demasiado extensas. Si se conoce la situación exacta de la zona débil, puede ser eficaz descargar material - - apropiado en el embalse, directamente encima de dicha área.

El proceso puede ser también natural. W.L. Strange ha descrito cómo el Much Kundi Tank, en Bijapur, India, formado por una presa de mamposte- ría en rocas pizarrosas, se impermeabilizó al cabo de 12 años de entarquina- miento natural.

La permanencia de cualquier autoimpermeabilización depende evidente- mente de la naturaleza de la filtración. Si el cierre se efectúa por completo en basalto y rocas similares, puede ser permanentemente eficaz; pero si sólo se consigue un resultado parcial en una formación caliza, entonces la constante - filtración, aunque pequeña, puede bastar a veces para ensanchar los conductos de la roca por disolución y volver a producir accidentes graves.

BIBLIOGRAFIA RESUMIDA

Billings, M. P.- Geología Estructural

Bolivar J. M.- Hidrología Subterránea (Algunos aspectos)

Cambefort, H.- Perforaciones y Sondeos

Castany, G, 1963, Traité practique des eaux souterraines: Ed. Dunod, Paris.

Coppens, R.- La Radiactividad de las Rocas

Dana, E. S.- Texbook of Mineralogy

Heinrich, E.W.M.- Petrografia Microscópica

Holmes, A.- Geología Física

Johnson, 1966. Ground water and wells: Ed. Edward E. Johnson, Inc., Saint Paul, Minnesota.

Krynine D. y Judd W - Principios de Geología y Geotécnia para Ingenieros.

Lahee, F. H.- Geología Práctica

Legget R.- Geología para Ingenieros

Longwell, C. R. y Flint R. F.- Geología Física

Pettijohn, E. J.- Rocas Sedimentarias

Shoeller, H. 1962 - Les eaux sauterraines: Ed: Masson et Cíe, Paris.

Trefethen, J.M. - Geología para Ingenieros.