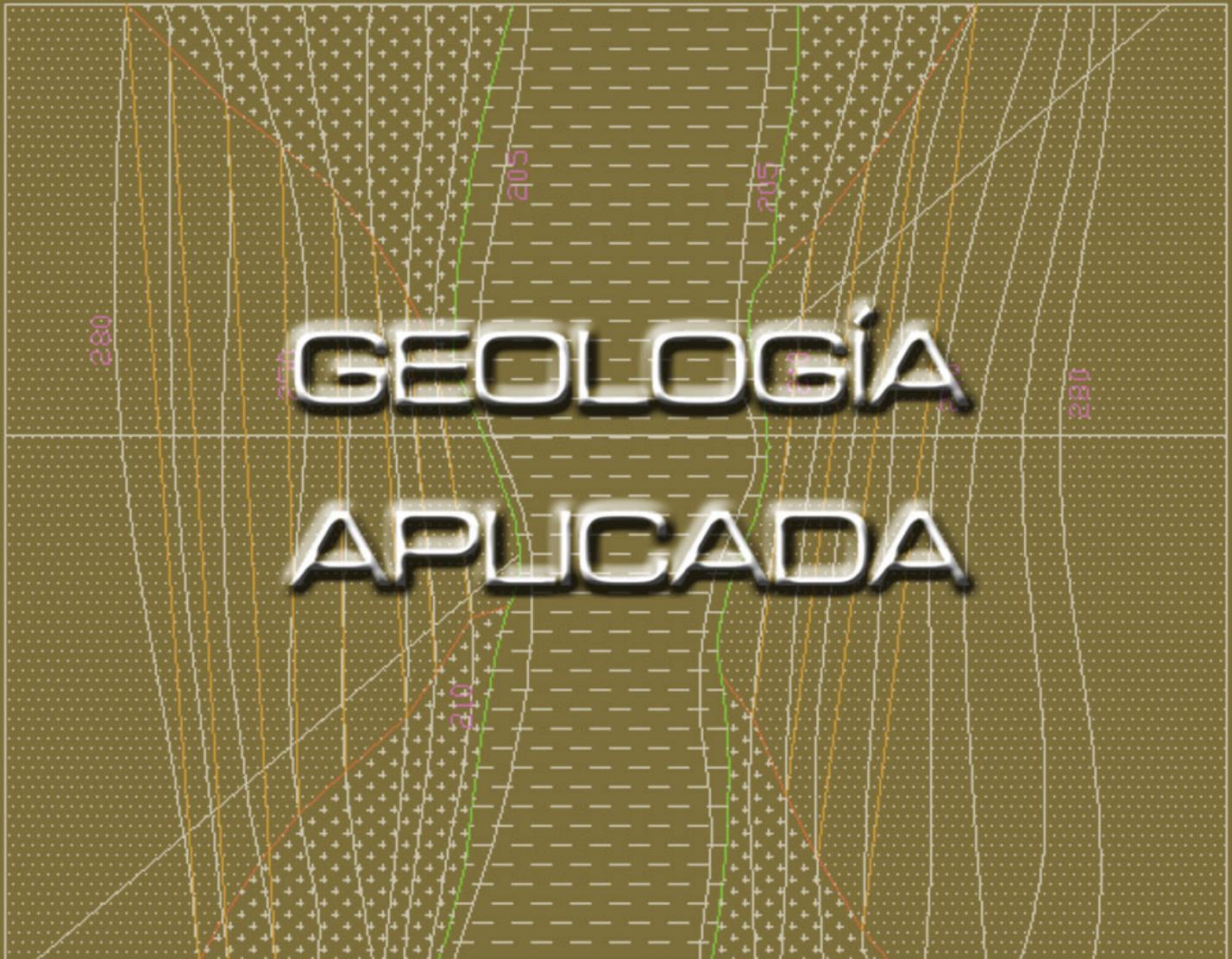




UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS



Oscar Plaza Diez

# ÍNDICE

<b>1. GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA.....</b>	<b>5</b>
FUNDAMENTOS .....	5
APLICACIONES .....	5
FENÓMENOS NATURALES. RIEGOS GEOLÓGICOS.....	5
CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA GEOLOGÍA.....	5
<b>2. GEOLOGÍA .....</b>	<b>7</b>
2.1. ENERGÍAS PRESENTES EN LA SUPERFICIE TERRESTRE .....	7
2.2. ORIGEN DE LA TIERRA.....	7
2.3. DIFICULTAD PARA SU ESTUDIO .....	7
2.4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA GEOLOGÍA .....	7
2.5. CONSTITUCIÓN DEL GLOBO TERRESTRE .....	8
2.6. TIPOS DE ONDAS.....	9
2.7. TEORÍAS ISOSTÁTICAS.....	9
<b>3. MINERALOGÍA .....</b>	<b>10</b>
3.1. MINERAL .....	10
3.2. FINALIDAD DE LA MINERALOGÍA .....	10
3.3. DIVISIÓN DE LA MINERALOGÍA .....	10
3.4. AGREGADOS CRISTALINOS.....	11
3.5. ROCA.....	11
3.6. MACIZO ROCOSO .....	11
3.7. PROPIEDADES DE LOS MINERALES .....	11
<b>4. PETROLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
4.1. DEFINICIONES .....	21
4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS .....	21
4.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS EN INGENIERÍA.....	23
4.4. RESISTENCIA.....	24
4.4.1. Resistencia a compresión .....	24
4.6. METEORIZACIÓN .....	26
4.6.1. Tratamiento de rocas alteradas.....	27
4.6.2. Influencia de las rocas alteradas en ingeniería civil.....	28
4.7. VELOCIDAD DE ONDAS ELÁSTICAS.....	28
4.8. RELACIÓN ENTRE ALGUNOS PARÁMETROS DE LAS ROCAS.....	29
4.9. CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS .....	30
4.10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO.....	30
<b>5. DISCONTINUIDADES DEL MACIZO .....</b>	<b>32</b>
5.1. TECTÓNICA Y GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	32
5.2. TEORÍAS OROGÉNICAS.....	32
5.3. LA DEFORMACIÓN DEL MATERIAL DE LA CORTEZA TERRESTRE .....	33
5.3.1. Diaclasas .....	34
5.3.2. Fallas .....	36
5.3.3. Fallas y terremotos .....	37
5.3.4. Pliegues.....	40
5.3.5. Clasificación geométrica de los pliegues.....	40
<b>6. AGUA EN EL MACIZO .....</b>	<b>43</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	43
6.2. EL CICLO DEL AGUA. BALANCE HÍDRICO. ACUÍFEROS .....	43
6.3. PERMEABILIDAD. TRANSMISIBILIDAD .....	44
6.4. MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD.....	45
6.4.1. Medida de la permeabilidad en el laboratorio .....	45
6.4.2. Ensayos “in situ” de la permeabilidad.....	45
<b>7. ROCAS ÍGNEAS.....</b>	<b>47</b>
7.1. DEFINICIÓN .....	47

7.2.	MINERALOGÍA.....	47
7.3.	ROCAS PLUTÓNICAS .....	47
7.3.1.	<i>Masas subyacentes</i> .....	47
7.3.2.	<i>Cuerpos tubulares</i> .....	48
7.3.3.	<i>Chimeneas</i> .....	48
7.4.	MATERIALES Y ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS.....	48
7.4.1.	<i>Tipos de erupciones volcánicas</i> .....	49
7.4.2.	<i>Manifestaciones póstumas</i> .....	49
7.5.	GRANITO Y ROCAS DE LA FAMILIA DEL GRANITO.....	49
7.5.1.	<i>Composición mineralógica</i> .....	50
7.5.2.	<i>Alteración de las rocas graníticas</i> .....	50
7.5.3.	<i>Utilización y comportamiento del granito</i> .....	50
7.5.4.	<i>Utilización y comportamiento de la aplita</i> .....	51
7.5.5.	<i>Utilización y comportamiento de la pegmatita</i> .....	51
7.5.6.	<i>Utilización y comportamiento de la sienita, diorita y gabro</i> .....	52
7.5.7.	<i>Utilización y comportamiento de la diabasa o dolerita</i> .....	52
7.5.8.	<i>Utilización y comportamiento del pórfido</i> .....	52
7.6.	UTILIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS .....	52
7.6.1.	<i>Utilización y comportamiento de las cenizas y tobas blandas</i> .....	52
7.6.2.	<i>Utilización del lapillo y escorias</i> .....	53
7.6.3.	<i>Utilización y comportamiento de la riolita</i> .....	53
7.6.4.	<i>Utilización y comportamiento de la andesita</i> .....	53
7.6.5.	<i>Utilización y comportamiento del basalto</i> .....	53
<b>8.</b>	<b>ROCAS SEDIMENTARIAS.....</b>	<b>54</b>
8.1.	DEPÓSITO DE LOS MATERIALES SEDIMENTARIOS.....	54
7.1.1.	<i>Ambientes sedimentarios continentales</i> .....	55
7.1.2.	<i>Ambientes sedimentarios marinos</i> .....	55
8.2.	LITIFICACIÓN DE SEDIMENTOS .....	55
8.3.	ROCAS SEDIMENTARIAS DETRÍTICAS.....	56
8.3.1.	<i>Gravas y arenas</i> .....	56
8.3.3.	<i>Arcillas</i> .....	57
8.3.4.	<i>Conglomerados</i> .....	59
8.3.5.	<i>Areniscas</i> .....	59
8.3.6.	<i>Limonita</i> .....	61
8.3.7.	<i>Arcillita</i> .....	61
8.4.	ROCAS SEDIMENTARIAS INTERMEDIAS .....	61
8.4.1.	<i>Marga</i> .....	61
8.5.	ROCAS SEDIMENTARIAS NO DETRÍTICAS .....	62
8.5.1.	<i>Rocas carbonatadas</i> .....	62
8.5.2.	<i>Rocas evaporitas</i> .....	64
8.5.3.	<i>ROCAS ORGANÓGENAS</i> .....	66
<b>9.</b>	<b>ROCAS METAMÓRFICAS .....</b>	<b>67</b>
9.1.	TIPOS DE METAMORFISMO.....	67
9.1.1.	<i>Metamorfismo dinámico</i> .....	67
9.1.2.	<i>Metamorfismo térmico o de contacto</i> .....	67
9.1.3.	<i>Metamorfismo regional</i> .....	67
9.2.	TEXTURA Y ESTRUCTURA .....	68
9.3.	MINERALES DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS .....	68
9.4.	UTILIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS .....	68
9.4.1.	<i>Mármol</i> .....	68
9.4.2.	<i>Cuarcitas metamórficas (metacuarcitas)</i> .....	68
9.4.3.	<i>Pizarras</i> .....	68
9.4.4.	<i>Filitas</i> .....	69
9.4.5.	<i>Esquistos</i> .....	69
9.4.6.	<i>Gneis</i> .....	70
9.4.7.	<i>Anfibolitas</i> .....	70
<b>10.</b>	<b>INVESTIGACIÓN DEL MACIZO.....</b>	<b>71</b>
10.1.	INTRODUCCIÓN .....	71
10.2.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	71
10.3.	LOS MEDIOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	71
10.3.1.	<i>Documentación previa</i> .....	71

10.3.2.	<i>Levantamiento geológico</i> .....	72
10.4.	INVESTIGACIONES PROFUNDAS.....	72
10.4.1.	<i>Investigaciones directas</i> .....	72
10.4.2.	<i>Investigaciones indirectas</i> .....	73
<b>11.</b>	<b>ESTRATIGRAFÍA</b> .....	<b>74</b>
11.1.	CONCEPTOS GENERALES.....	74
<b>12.</b>	<b>GEOLOGÍA HISTÓRICA</b> .....	<b>75</b>
12.1.	ERA ARCAICA .....	75
12.1.1.	<i>Arcaico</i> .....	75
12.1.2.	<i>Precámbrico</i> .....	75
12.2.	ERA PRIMARIA O PALEOZOICA .....	75
12.2.1.	<i>Cámbrico</i> .....	76
12.2.2.	<i>Ordovícico</i> .....	76
12.2.3.	<i>Silúrico</i> .....	76
12.2.4.	<i>Devónico</i> .....	76
12.2.5.	<i>Carbonífero</i> .....	76
12.2.6.	<i>Pérmico</i> .....	77
12.2.7.	<i>Terrenos primarios en España</i> .....	77
12.3.	ERA SECUNDARIA O MESOZOICA .....	77
12.3.1.	<i>Triásico</i> .....	77
12.3.2.	<i>Jurásico</i> .....	78
12.3.3.	<i>Cretácico</i> .....	78
12.4.	ERA TERCIARIA O CENOZOICA.....	78
12.4.1.	<i>Distribución del terciario en España</i> .....	79
12.5.	ERA CUATERNARIA O NEOZOICO.....	79



# 1. GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

Es el conjunto de conocimientos geológicos relacionados con la ingeniería, es decir, las implicaciones del terreno, su naturaleza, estado físico y tensional que tiene por las obras realizadas por el hombre y los fenómenos naturales que pueden afectarlas.

## FUNDAMENTOS

- Mecánica de suelos
- Mecánica de rocas
- Hidrogeología
- Investigaciones “in situ”
- Mapas geotécnicos

## APLICACIONES

- Cimentaciones
- Taludes
- Túneles
- Presas
- Escolleras
- Terraplenes

## FENÓMENOS NATURALES. RIEGOS GEOLÓGICOS

- Deslizamientos
- Hundimientos y subsidencias
- Fallas
- Terremotos
- Riesgos sísmicos

## CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA GEOLOGÍA

- Estudios de viabilidad de proyectos
- Estudios de terreno
- Estudios de cuencas fluviales
- Obras sobre cauces fluviales
- Obras marítimas



- Corrección y mejoras del terreno
- Cimentaciones
- Excavaciones subterráneas
- Canteras
- Impacto medioambiental
- Riesgos geológicos
- Prevención, explotación y conservación de obras



## 2. GEOLOGÍA

La geología estudia la composición y constitución de la corteza terrestre, los fenómenos que en esta acaecen y las leyes físicas y químicas por las que se rigen.

La geología investiga la historia y evolución de las actividades de la tierra desde los tiempos más remotos hasta el momento actual, la composición, disposición y origen de las rocas y los minerales que forman la corteza terrestre y los procesos que han dado lugar a su presente estructura.

### 2.1. ENERGÍAS PRESENTES EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

- Magnetismo
- Gravedad
- Energía solar
- Energía química
- Energía interna

### 2.2. ORIGEN DE LA TIERRA

La tierra tiene una edad de 4.500 millones de años.

Las teorías cosmológicas son:

- **Big-bang.** Acreción a partir de partículas frías
- **Estado estacionario.** Creación de materia continua
- **Fragmento incandescente de una estrella**

### 2.3. DIFICULTAD PARA SU ESTUDIO

- **Métodos directos:** sondeos (16 km en la P. KOLA)
- **Métodos indirectos:** estudios de los fenómenos físicos (Presión, Temperatura,...)

### 2.4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA GEOLOGÍA

- **Uniformismo.** Las leyes físicas son inmutables y universales
- **Actualismo.** Las mismas causas producen los mismos efectos. Las leyes no varían con el tiempo, salvo su intensidad y periodicidad.
- **Ciclo geológico.** La tierra está en constante evolución debido a:
  - **Fenómenos geodinámicos internos.** Diastrofismo (deformación de la corteza), volcanes, terremotos, orogenias. Calor interno, positivos porque se producen montañas.
  - **Fenómenos geodinámicos externos.** Erosión, transporte, sedimentación, energía sola. Son negativos porque arrasas montañas.



- **Suceso geológico.** Cualquier variación de la tierra constituye un suceso geológico. Se produce un fenómeno geológico cualquiera en un tiempo, en un espacio con un ambiente determinado y con un consumo de energía.

El tiempo en geología. La unidad de tiempo son millones de años debido a que los procesos son lentos, excepto algunos.

- **Cronología absoluta.** Indica el tiempo transcurrido desde que se produce un suceso hasta el momento que se mide.
- **Cronología relativa.** Establece el orden cronológico en el que se producen los procesos, basados en:
  - Principio de superposición normal. Horizontabilidad inicial (Steno, 1699).
  - Un suceso es posterior a estratos a los que afecta y anterior a los no afectados por él.
  - Sucesión faunística.
  - Fósil característico (abundante, gran dispersión y evolución rápida).

## 2.5. CONSTITUCIÓN DEL GLOBO TERRESTRE

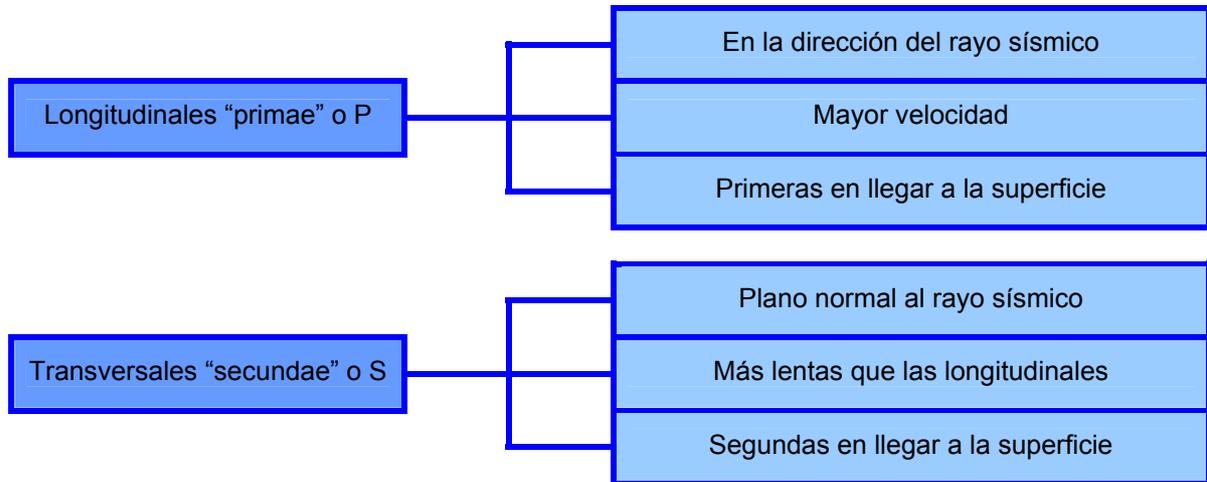
Estructura zonal de la tierra:

- **Atmósfera:** 800 Km (N=78%, O=21%, CO<sub>2</sub> y gases nobles 1%).
- **Corteza.**
  - Hidrosfera. Mares 98%, Hielo 1'87% y Agua 0'13%.
  - Litosfera. SIAL y DIMA. De 0 a 40 Km. Densidad = 2'8 – 3 gr/cm<sup>3</sup>.
- **Manto superior.** Discontinuidad de MOHOROVICIC.
  - De 40 a 900 Km. Densidad = 3 – 4 gr/cm<sup>3</sup>.
- **Manto inferior.** Discontinuidad de BULLEN.
  - De 900 a 2.900 Km. Densidad 4 – 6 gr/cm<sup>3</sup>.
- **Núcleo externo.** Discontinuidad de GUTTENBERG.
  - De 2.900 a 5.120 Km. Densidad 6 – 11 gr/cm<sup>3</sup>.
- **Núcleo interno.** Discontinuidad de WIECHERT.
  - De 5.120 a 6.370 Km. NIFE. Densidad 12 – 13'6 gr/cm<sup>3</sup>.

Esta estructura zonal de la tierra se ha obtenido por:

- Estudio de ondas sísmicas.
- Variación de la temperatura. Gradiente térmico 33 m ~ 1°C.
- Variación de presión y densidad.
- Anomalías de la gravedad.

## 2.6. TIPOS DE ONDAS



La velocidad de las ondas P y S aumentan conforme aumenta la densidad. Hay que tener en cuenta que las curvas S no se transmiten en el núcleo.

## 2.7. TEORÍAS ISOSTÁTICAS

- **Presión litostática.** Depende de la densidad y espesor de las capas.
- **Superficie de equilibrio isostático.** A 100 – 200 Km.
- **Hipótesis de Airy.** La compensación se realiza por el engrosamiento cortical – raíces bajo las montañas y el adelgazamiento bajo las depresiones.
- **Hipótesis de Platt.** Los bloques más altos deben tener menor densidad para que el peso se reparta por igual en el plano.



### 3. MINERALOGÍA

Ciencia que estudia los materiales.

- Origen.
- Composición.
- Forma.
- Propiedades.
- Yacimiento.

Además:

- Materia cristalina.
- Geoquímica de los elementos.
- Distribución en la tierra.

#### 3.1. MINERAL

Es un cuerpo natural, homogéneo, inorgánicos con una composición química definida, con una disposición atómica ordenada y que forma parte de la corteza terrestre.

#### 3.2. FINALIDAD DE LA MINERALOGÍA

Determinar:

- Propiedades de los minerales.
- Leyes que los rigen.
- Génesis.
- Yacimientos.
- Aplicaciones.

#### 3.3. DIVISIÓN DE LA MINERALOGÍA

- Física mineral y cristalografía.
- Química mineral y cristalografía.
- Génesis y yacimientos.
- Mineralotecnica.



### 3.4. AGREGADOS CRISTALINOS

Durante el proceso de formación, los cristales tienden a unirse formando **agregados cristalinos**.

- **Homogéneos.** Una sola especie mineral.
  - Regulares. Uniáxicos, paralelos y mallas.
  - Irregulares. Geodas y drusas.
- **Heterogéneos.** Más de una especie (ROCAS)

### 3.5. ROCA

Agregado de más de una especie mineral que presenta los mismos caracteres de conjunto en una cierta área de cierta extensión de la corteza terrestre (matriz rocosa).

### 3.6. MACIZO ROCOSO

Un conjunto constituido por una o varias matrices rocosas que presentan una determinada estructura, está afectado por un cierto grado de alteración y por una serie de discontinuidades.

ROCA + ALTERACIÓN + DISCONTINUIDADES

### 3.7. PROPIEDADES DE LOS MINERALES

- Escalares. No varían con la dirección (Presión y Temperatura).
  - **Peso específico.**
  - **Densidad.**
  - **Calor específico.**
- Vectoriales. Varían con la dirección.

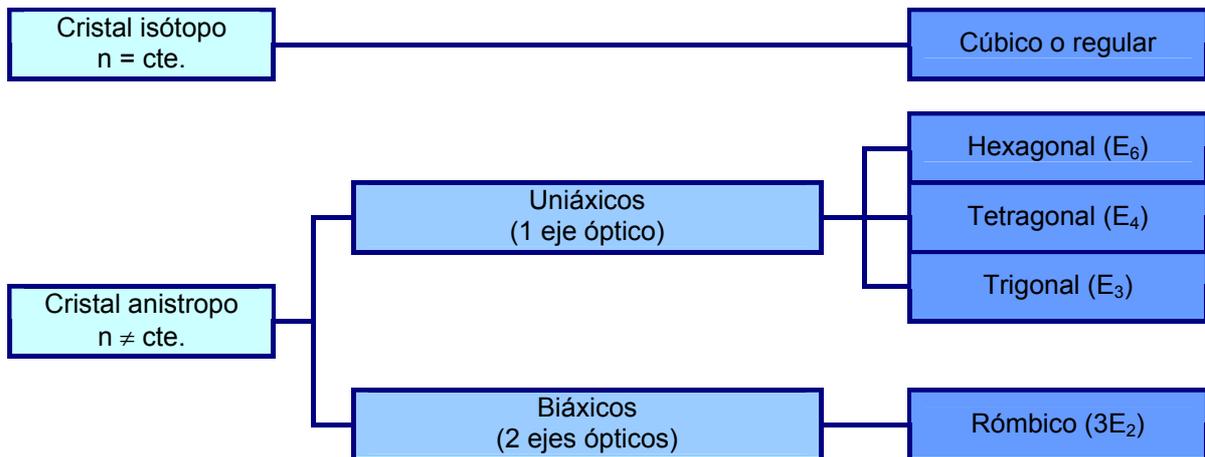
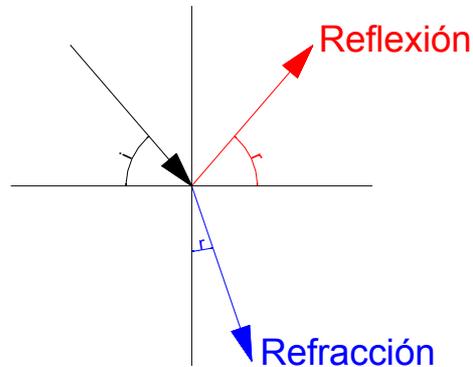
Propiedades que dependen de la cohesión:

- **Cohesión:** resistencia a variar las partículas sus distancias.
- **Elasticidad:** esfuerzo para recuperar su forma primitiva.
- **Coherencia:** resistencia a disgregarse.
- **Dureza:** resistencia de un mineral a ser rayado.
- **Exfoliación:** separación en láminas.
- **Fractura:** superficie de rotura.

Propiedades ópticas:

- **Reflexión.**  $\hat{i} = \hat{r}$  (leyes de SNELIUS)

- **Refracción.**  $n = \frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}}$  = índice de refracción.  $1.2 < n < 3$ . Es un carácter típico de cada mineral.



- **Brillo.** Reflexión o refracción de la luz en el cristal.
  - ▶ Metálico.  $n \geq 3$ .
  - ▶ Submetálico.  $3 < n < 2$ .
  - ▶ Adamantiud  $2 < n < 1.3$ .
  - ▶ Vítreo.  $1.3 < n < 1.9$ .
  - ▶ Céreo. Minerales amorfos.
  - ▶ Nacaredo (yeso laminar).
- **Color y raya.** Longitudes de onda no absorbida. Negro: cuando absorbe todas.
  - ▶ **Luminiscencia.** Emisión de luz de un mineral.
  - ▶ **Fluorescencia.** Por irradiación con rayos ultravioleta.
  - ▶ **Fosforescencia.** Después de la radiación.

► **Termoluminiscencia.** Por calentamiento.

Propiedades magnéticas:

- Minerales atraídos por el imán.
- Magnéticos – paramagnéticos – diamagnéticos.

Propiedades eléctricas:

- **Conductores.** Enlace metálico (elementos metálicos y sulfatos).
- **No conductores.** Enlace covalentes.
- **Piroeléctricos.** Por calentamiento (turmalina).
- **Piezoeléctricos.** Por presión (cuarzo).

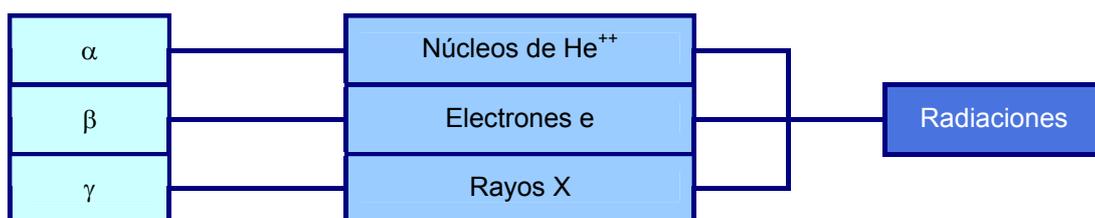
Propiedades que dependen de la superficie:

- **Humedescibilidad:** propiedad de un mineral para cubrir su superficie de una película de agua.
- **Liófilos.** Se mojan.
- **Liófobos.** Repelen el agua.

Propiedades radiactivas:

En los minerales la radiación se relaciona con la presencia de Uranio y Thorio.

La desintegración de los átomos de dichos elementos U y Th.



Registro de sondeos ( $\gamma$  natural).

### 3.8. MINERALOGÍA DESCRIPTIVA

En mineralogía existen varios sistemas de dosificación de los minerales

#### 3.8.1. Sistemas histórico – natural (Berzelius 1.850)

Se base en:

- Forma cristalina.
- Propiedades físicas.
- Composición química.



- Condiciones de yacimiento.

Se conocen del orden de 3.000 especies de minerales y se descubren 25 por año.

Los nombres de los minerales derivan de las raíces griegas o latinas.

Los minerales se dividen en 8 clases:

**Clase I.** Elementos nativos.

**Clase II.** Sulfuros.

**Clase III.** Óxidos e hidróxidos.

**Clase IV.** Halogenuros.

**Clase V.** Carbonatos, nitratos, boratos y yodatos.

**Clase VI.** Sulfatos, cromatos, molibdatos y volframatos.

**Clase VII.** Fosfatos, arseniatos y vanadiatos.

**Clase VIII.** Silicatos

a) CLASE I. ELEMENTOS NATIVOS

Se presentan aislados. Tienen poca afinidad química suelen ser de alta densidad y tienen enlace metálico, o no metálico.

- Elementos metálicos (cúbico).

Au, Ag, Pt, Cu, Hg y Fe

- Elementos no metálicos

S, As, Sb, Bi, Grafito y diamante.

Grafito: carbono puro (hexagonal)

Diamante: carbono puro (cúbico), muy duro, frágil y buen conductor.

b) CLASE II. SULFUROS

Combinaciones no oxigenadas de azufre con metales y no metales. Son opacos, de aspecto metálico y peso específico elevado.

BLENDA (SZn). Mena de Zinc, color caramelo (Asturias y Galicia).

GALENA (SPb). Mena de plomo, color gris (Linares y Cartagena).

PIRITA (S<sub>2</sub>Fe). Fe, Cu, Ag, S y Au (Riotinto).

CALCOPIRITA (S<sub>2</sub>CuFe). SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub> industria química.

CINABRIO (SMg). Mena de Magnesio.

c) CLASE III. ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS

Combinaciones oxigenadas que no tienen carácter salino. Menas de Fe, Al, Si y Sn.

Óxidos:

- Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>).

- Oligisto (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

- Corindón (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



- Rutilo ( $\text{TiO}_2$ ).
- Casiterita ( $\text{SnO}_2$ ).

Hidróxidos:

- Bauxita.
- Laterita.
- Limonita.

d) CLASE IV. HALOGENUROS

Combinaciones de los halógenos (F, Cl, Br, I) con otros elementos alcalinos o alcalinotérreos (Na, K, Mg, Ca). Enlace iónico, aspecto lapídeo y generalmente solubles.

Su génesis: por evaporación de lagos salares o por sublimación en zonas volcánicas.

HALITA o sal común ( $\text{ClNa}$ ).

SILVINA ( $\text{ClK}$ ).

FLUORITA ( $\text{F}_2\text{Ca}$ ).

CARNALITA ( $\text{ClK}$ ,  $\text{Cl}_2\text{Mg}$ ,  $6\text{H}_2\text{O}$ ).

Una vez evaporados las sales de los lagos salados subterráneos, éstos se usan para almacenar gas. Lo hacen la empresas como gas natural.

e) CLASE V. CARBONATOS, NITRATOS, BORATOS Y YODATOS

- Carbonatos ( $\text{CO}_3^-$ )
  - Grupo de la calcita (trigonales)
    - Calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).
    - Magnesita ( $\text{CO}_3\text{Mg}$ )
    - Dolomita ( $\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$
    - Sidorita
  - Grupo del aragonito (rómbo)
  - Aragonito ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ )
  - Witherita ( $\text{CO}_3\text{Ba}$ )
  - Estrocionita ( $\text{CO}_3\text{Sr}$ )
  - Cerusita ( $\text{CO}_3\text{Pb}$ )
- Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Sales de ácido nítrico.
  - Nitrato sódico ( $\text{NO}_3\text{Na}$ ). Usado para fertilizantes.
- Boratos ( $\text{BO}_3^-$ ). Sales de ácido bórico.

f) CLASE VI. SULFATOS, CROMATOS, MOLIBDATOS Y WOLFRAMATOS

Minerales de aspecto no metálico, densidad no muy alta y poco duros.



- Sulfatos ( $\text{SO}_4^{++}$ )
  - Baritina ( $\text{SO}_4\text{Ba}$ )
  - Anglesita ( $\text{SO}_4\text{Pb}$ )
  - Celestina ( $\text{SO}_4\text{Sr}$ )
  - Anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ) +  $\text{H}_2\text{O}$  aumenta 60% su volumen
  - Yeso ( $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Soluble en agua circulante, ataca al  $\text{AC}_3$
- Cromatos ( $\text{CrO}_4^-$ )
  - Crocoita ( $\text{CrO}_4\text{Pb}$ )
- Molibdatos ( $\text{MoO}_4^-$ )
  - Wulfenita ( $\text{MoO}_4\text{Pb}$ )
- Wolframatos ( $\text{WO}_4^-$ )
  - Sheelita ( $\text{WO}_4\text{Ca}$ )
  - Wolframia ( $\text{WO}_2$ ,  $\text{CFe}$ ,  $\text{Mn}$ )Ambos forman el carburo de wolframio **WIDIA**.

#### g) CLASE VII. FOSFATOS, ARSENIATOS Y VANADATOS

Formados por tetraedros.

- Fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ )
  - Monacita ( $\text{PO}_4\text{Co}$ )
  - Apatito ( $(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH})$ )
- Arseniatos ( $\text{AsO}_4^-$ )
- Vanadatos ( $\text{VO}_4^-$ )

#### h) CLASE VII. SILICATOS

Minerales formados por el grupo  $\text{SiO}_4^+$  en forma de tetraedros, cuyo centro lo ocupa el Si y el O en los vértices.

- Tetraedros aislados o agrupados. Son una tercera parte de los elementos conocidos.
- El 95% de los materiales de la corteza son silicatos; el 60% de ellos son feldespatos, el 12% cuarzo y el resto piroxenos, anfíboles, arcillas.
- Los elementos más abundantes son: O (47%), Si (28%) y Al (8%).
- Son componentes químicos complejos. Se clasifican por la estructura de los enlaces OSi. Son tan fuertes que adoptan la forma de tetraedros (de ahí su permanencia en la corteza terrestre).
- Diadoquia: sustitución de un átomo de Si por Al.



Clasificación de los silicatos:

1 NEOSILICATOS

4 INOSILICATOS

2 SOROSILICATOS

5 FILOSILICATOS

3 CICLOSILICATOS

6 TECTOSILICATOS

### 1 NEOSILICATOS

(Nesos = isla). El Si y O se encuentran tetraedros aislados.

- Se unen entre sí por cationes que saturan sus valencias.
- No se sustituye el Si por Al.
- No contienen cationes alcalinos.
- Forman cristales equidimensionales redondeados y de gran dureza.

Los minerales son:

- Olivino: serie isomorfa. Son rocas básicas y ultrabásicas, como basalto y periclotitas.
- Andalucita – sillimanita –distena. Serie polimórfica.

Rocas metamórficas (pizarras, esquistos, gneis):

- Circón ( $\text{SiO}_4\text{Zn}$ ). Pegmatitas.
- Topacio ( $\text{SiO}_4\text{Al}_2(\text{OH}$  y F). Pegmatitas.
- Granate ( $\text{SiO}_4(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Mn})$ ). Rocas metamórficas.

### 2 SOROSILICATOS

(Soros = grupo). Estructura en cadenas de dos tetraedros que comparten un átomo de O. Pocos minerales.

- Hemimorfita (calanina)  $\text{SiO}_2\text{Zn}_4(\text{OH})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$
- Epidota  $\text{SiO}_7(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Ca})$  verde

Son piro y piezo-eléctricos. Rocas metamórficas.

### 3 CICLOSILICATOS

(Ciclo = anillo). Están compuestos por anillos de 3, 4, 6 tetraedros con 6<sup>-</sup>, 8<sup>-</sup>, 12<sup>-</sup> valencias sin saturar:

- 3 Tetraedros. Beniodita.  $\text{SiO}_3\text{O}_4$  (T, Ba). Escaso.



- 4 Tetraedros. Aixinita.  $\text{Si}_4\text{O}_{12}$  (Mn, Fe, Ca, B). Escaso.
- 6 Tetraedros. Berilo.  $\text{Si}_6\text{O}_8$ (Be, Al). Granito y pegmatitas.

#### 4 INOSILICATOS

(Ino = hilo). Tetraedros formando cadenas simples (piroxeno) o dobles (anfíboles).

- Cadenas simples. Piroxenos y piroxenoides.
  - Rómbico.
  - Monoclínico.
  - Triclínico

Forman rocas básicas y ultrabásicas, grabos, basaltos y perioditas.

- Cadena doble. Anfíboles:
  - Rómbico
  - Monoclínico.

#### 5 FILOSILICATOS

(Filo = capa). Los tetraedros se encuentran encajados formando capas pseudo hexagonales compartiendo tres de cuatro oxígenos con otros tetraedros.

- Estructura en láminas: cadenas dobles prolongadas en dos dimensiones. Exfoliación.
- Se estudian con microscopio electrónico, rayos X y análisis diferencial.
- Minerales de la arcilla:
  - Minerales estables a cualquier temperatura.
  - Arcilla: material terroso de grano fino que se vuelve plástico con el  $\text{H}_2\text{O}$ .
  - Son aluminosilicatos complejos hidratados con Fe, Mg, Ca, Na.
  - Proceden de la meteorización de las rocas ígneas.
  - Forman los suelos.

a) Grupo del caolín

Alteración total del feldespato terroso plástico con agua. Se utiliza en cerámicas y porcelanas.

b) Montmorillonita o **bentonita**

Alteración de cenizas volcánicas o puzolánicas. Se presentan en masas deleznable, suaves al tacto, se hinchan con agua sin perder plasticidad. Porque mezclado con agua da un lodo (Tixotropía). Si agitamos un sólido, éste se convierte en gel y posteriormente en líquido, pero si dejo de agitar el líquido se convertirá en gel y posteriormente será sólido. Se usa como plastificantes y como lodos de perforación. Arcillas expansivas.



c) Grupo de la vermiculita

Alteración de las micas, exfoliables. Tienen talco y son aislantes.

d) Grupo de las micas

Con láminas muy finas y exfoliables.

- Micas negras: Biotita
- Micas blancas: Moscovita.
- Micas litiníferas: compuestas por litio.

e) Grupo del talco.

Son rocas ultrabásicas.

f) Grupo de la clorita

Alteración de la biotita

## 6 TECTOSILICATOS

(Tecto = armazón). Forman redes tridimensionales en los que cada tetraedro comparte cuatro O.

Se presenta diadoquia donde el electrón se satura con  $\mu \leq B$ .  $SiO_4^+ \rightarrow Al_3 + e^-$

Dependiendo de la relación Si/Al pueden ser:

- 1/1 Celsiana – anortita.
- 3/1 Ortosa – Atrita.

Son minerales blancos, densidad baja (2'6) y dureza desigual (2-7).

Hay tres grupos: de la sílice, feldespatos y feldespatoides.

a) Grupo de la sílice

- Cuarzo. Es trigonal, abundante (12%), incoloro o blanco, duro (7), frágil, vítreo

b) Grupo de los Feldespatos

Los más abundantes (60%). Cristales tubulares, colores claros, baja densidad, con cationes diversos. Pueden ser:

- Monoclínicos
- Triclínicos

Forman rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

c) Grupo de los feldespatoides.



Tienen una estructura y composición próxima a los feldespatos. Tienen un déficit de cuarzo. Son incompatibles con el cuarzo con el que reaccionan para dar feldespatos. Sus sistemas de cristalización son regulares y hexagonales.



## 4. PETROLOGÍA

### 4.1. DEFINICIONES

La corteza terrestre o litosfera está constituida por un conjunto de materiales “ROCAS” que engloba la totalidad de los minerales, excepto el agua y el hielo.

**Roca o matriz rocosa** puede definirse como agregado de más de una especie mineral, que presenta los mismos caracteres de conjunto en un área de cierta extensión de la corteza terrestre.

**Macizo rocoso o masa rocosa:** es un conjunto constituido por una o varias matrices rocosas que:

- Presentan una determinada estructura.
- Que está afectado por un cierto grado de alteración.
- Que tiene una serie de discontinuidades.

La **petrología** es la ciencia que estudia las rocas en el sentido más amplio, desde su origen, composición, propiedades físico-químicas, transformación, etc.

La **petrografía** es la parte de la petrología que se ocupa de la discontinuidad de las rocas y su clasificación. El análisis petrográfico nos dice:

- La composición mineralógica de la roca.
- Tamaños de los minerales constituyentes.
- Estructura.
- Orientación interna de los minerales.
- La alteración, la porosidad y la microfisuración de la roca.

La **mecánica de las rocas** son las propiedades de las rocas mediante ensayos.

Existen cerca de 2.000 especies de minerales conocidos. En las rocas los más importantes son 50 y sólo 30 son los más habituales. Los más abundantes son: silicatos (95%), carbonatos, sulfatos.

Los minerales se consideran esenciales si forman más del 5% y accesorios si forman menos del 5%.

**Textura** es la apariencia física de la matriz rocosa, aspectos geométricos y las relaciones entre las partículas o cristales que lo componen.

**Estructura** es el aspecto megascópico del macizo rocoso, es decir, la roca estudiada en todo su afloramiento, no con una pequeña muestra o sección delgada de la misma.

### 4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS

Clasificación geológica según su origen:

- **Rocas ígneas.** Se forman por enfriamiento o cristalización del magma (ácido o básico).
- **Rocas sedimentarias.** Se forman a partir de rocas preexistentes por procesos de erosión, transporte, sedimentación o precipitación química. Son el resultado de sedimentos en capas.



- **Rocas metamórficas.** Se forman a partir de otras rocas como resultado de cambios estructurales, químicos y mineralógicos debido a las acciones de presión, calor, etc. ocurridos en superficie.

Las rocas ígneas + metamórficas ocupan el 95% del volumen de la corteza terrestre

Las rocas sedimentarias ocupan el 5% del volumen restante de la corteza terrestre.

Las rocas sedimentarias ocupan el 75% de la superficie de la corteza terrestre.

Las rocas ígneas + metamórficas ocupan el 25% de la superficie restante de la corteza terrestre.

Clasificaciones ingenieriles:

- **Deere y Miller.** Clasifica la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de la roca.
- **Turk y Dearman.** Clasificación de la roca matriz en función de la resistencia a compresión y la relación módulo elástico tangencial / módulo de Poisson.
- **Lama y Vatukuri.** La clasificación se basa en resistencia a compresión uniaxial.

Las propiedades a estudiar en un emplazamiento son:

- Las resistencias características de las rocas en sus varios grados de meteorización (relación entre esfuerzos, cohesión, ángulo de rozamiento, dureza y otros).
- Las características de deformabilidad de la roca en sus varios grados de alteración, incluyendo la deformabilidad instantánea y a largo plazo.
- Velocidad de propagación de la onda elástica en la roca, teniendo en cuenta los distintos grados de meteorización.
- Densidad, porosidad, contenido de agua y otras propiedades.

La **anistropía** consiste en reconocer la resistencia y deformabilidad de la roca

Tipos de clasificación de las rocas:

- Química: Ácidas (>65% SiO<sub>2</sub>)  
Neutras (52-65% SiO<sub>2</sub>)  
Básicas (52-10% SiO<sub>2</sub>)  
Ultrabásicas (<10% de SiO<sub>2</sub>)
- Químico – mineralógica.
- Mineralógica. Presencia / ausencia de minerales cardinales.
- Yacimiento. Masas, filones, estratos, coladas.
- Textura. Forma, tamaño, distribución, cristalización.
- Estructura. Orden, distribución a escala del macizo rocoso.
- Ciclo petrológico. Las rocas sufren transformaciones a lo largo del tiempo, debido a los agentes geodinámicos internos y externos.



### 4.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS EN INGENIERÍA

Las clasificaciones petrográficas científicas no tienen en cuenta las propiedades mecánicas o ingenieriles. Se deducen de las propiedades de la “matriz rocosa” determinados in situ o en el laboratorio sobre muestras adecuadas.

**Ensayo en laboratorio.** Tiene un coste reducido y la posibilidad de hacer muchas muestras puntuales que permitan analizar heterogeneidad del macizo y la dispersión de resultados. Hay garantía en ellos.

**Ensayo in situ.** Se ensaya en zonas de meteorización donde la toma de muestras resulta difícil. Se puede ensayar gran volumen de roca y determinar propiedades ligadas al macizo como tensiones naturales, permeabilidad, etc.

<b>Ventajas de los distintos tipos de ensayos para la definición de un macizo rocoso</b>	
<b>Ensayos en laboratorio</b>	<b>Ensayos “in situ”</b>
Coste reducido	Posibilidad de ensayar zonas con meteorización elevada en donde la toma de muestras resulta difícil
Posibilidad de tomar muchas muestras puntuales que permiten analizar la heterogeneidad del macizo y la dispersión de los resultados	Posibilidad de ensayar volúmenes importantes de roca englobada en el macizo
	Determinación de propiedades ligadas al macizo: tensiones naturales, permeabilidad, etc.

La Sociedad Internaciones de Mecánica de Rocas (ISRM) recomienda estudiar las siguientes propiedades en cada emplazamiento de rocas:

- Resistencia
  - Compresión (simple o confinada).
  - Cohesión
  - Ángulo de rozamiento
  - Resistencia al desgaste
  - Dureza
  - Tracción (Ensayo brasileño o Ensayo Franklin)
- Deformabilidad
  - Flexión y deformabilidad instantánea y a corto, medio y largo plazo.
- Velocidad de las ondas elásticas

Se hace en campo o en laboratorio con ultrasonidos.



- Anisotropía

Con vistas a conocer la resistencia y deformabilidad de la roca.

- Otras propiedades

Densidad, porosidad, contenido de agua, dureza y figuración. Diaclasas, juntas, fracturas, fallas, deslizamientos.

- Alterabilidad

Factores de meteorización. Resistencia a las heladas y resistencia al choque eléctrico.

#### 4.4. RESISTENCIA

##### 4.4.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se utiliza mucho para el cálculo y viene definida por:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

El ensayo se realiza colocando una probeta cilíndrica en una prensa  $L \geq 2D$ . Los resultados del ensayo dependen de:

- El rozamiento entre placas de la prensa y las superficies de la muestra.
- La geometría de la muestra.
- La velocidad de propagación de la carga.
- El ambiente (temperatura y humedad).

Con el ensayo de resistencia a compresión se mide la deformación de la roca, mediante las curvas de tensión / deformación. A partir de éstas curvas se pueden determinar:

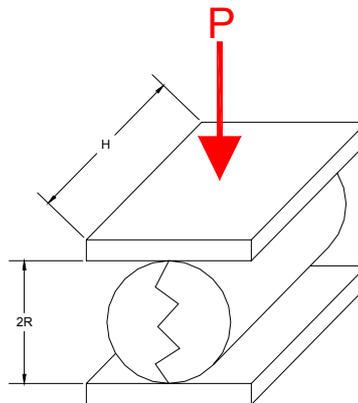
- El coeficiente de Poisson:  $\nu = \frac{\text{deformación} \cdot \text{transversal}}{\text{deformación} \cdot \text{longitudinal}}$
- El módulo elástico estático:  $E = \frac{\text{Tensión}}{\text{deformación} \cdot \text{unitaria}}$

Clasificación de Deere y Miller (1966)		
Clases de rocas según su resistencia a compresión		
Clase	Descripción	$\sigma_c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
A	Resistencia muy alta	2.250
B	Resistencia alta	1.120 – 2.250
C	Resistencia media	560 – 1.120
D	Resistencia baja	280 – 560
E	Resistencia muy baja	280

#### 4.4.2. Resistencia a tracción

En el ensayo a tracción, la norma ISRM nos indica los métodos para determinar la resistencia a tracción de una roca.

- Métodos directos. Consiste en someter a una muestra cilíndrica a tracción por sus extremos. No suele ser utilizado.
- Ensayo brasileño. En el cual se somete a la probeta cilíndrica a una carga diametral hasta la rotura.



$$\sigma_t = 2 \cdot \frac{P}{\pi \cdot D \cdot H} = \frac{P}{\pi \cdot R \cdot H}$$

A veces se utiliza el ensayo de carga puntual o ensayo de Franklin que se puede realizar utilizando testigos de sondeo o fragmentos de roca. Obtenemos un índice de resistencia I de valor:

$$I(\text{MPa}) = \frac{P}{D^2}$$

Donde P es la carga de rotura en megaNewton y D el diámetro de la muestra en cm.

#### 4.5. MINERALOGÍA DE LA ROCA MATRIZ, TEXTURA Y ESTRUCTURA

Según se desprende de la definición de roca, ésta está constituida por minerales. Aunque el número de minerales es de unos 1.700 sólo alrededor de 50 forman las rocas y de ellos 30 son los más comunes. Es evidente que esta circunstancia favorece enormemente el análisis petrográfico de las rocas.

El estudio e identificación de la matriz rocosa, que se hace mediante análisis petrográficos puede parecer innecesario desde el punto de vista del ingeniero civil, pero en muchas ocasiones es la única manera de poder averiguar con exactitud qué roca es la presente en un emplazamiento o la que vamos a aprovechar.

El estudio petrográfico será realizado por un especialista mediante el análisis de una lámina delgada con microscopio petrográfico, rayos X u otras técnicas.

La **textura** es la apariencia física general o carácter de la matriz rocosa, incluyendo los aspectos geométricos y mutuas relaciones entre las partículas o cristales componentes.



No debe confundirse con la estructura, que es el aspecto megascópico de una roca o mejor del macizo rocoso, es decir, la roca estudiada en el afloramiento.

De las dos características señaladas evidentemente la estructura es la que tiene mayor interés para la ingeniería civil, ya que su influencia sobre una obra puede ser muy grande.

#### 4.6. METEORIZACIÓN

Es la alteración que sufren las rocas al estar expuestas a la acción de los agentes atmosféricos. Estrictamente todas las rocas presentan alteración en mayor o menor grado, pero ocurre que en algunos casos se ha llegado a un estado de equilibrio que evita el avance del proceso de degradación.

Realmente la meteorización se produce en el macizo y lógicamente afecta a la matriz. La presencia de fracturas es determinante en los procesos de alteración. Los procesos de meteorización puede dividirse en:

- **Meteorización mecánica.** Alteración de la roca por cambios de temperatura, hielo – deshielo, ciclos humedad – sequedad, expansión causada por raíces, etc.
- **Meteorización química.** Que tiene como agente principal el agua, puede presentar las clases siguientes:
  - **Oxidación.** Común en los materiales férricos.
  - **Carbonatación.** Reacción de los minerales con el CO<sub>2</sub> disuelto en agua.
  - **Hidrólisis.** Descomposición por presencia de agua.
  - **Hidratación.** Adición de agua a la estructura del mineral.
  - **Cambio catiónico.** Transformación de cationes.
  - **Quelación.** Incorporación de cationes metálicos a moléculas de hidrocarburos.
- **Meteorización biológica** es la debida a los seres vivos y no suele ser muy importante.

La meteorización no se limita a procesos superficiales sino que penetra en el interior del terreno, lo cual implica la presencia de roca alterada al realizar obras subterráneas, abrir canteras, etc.

Los factores que intervienen en el proceso de meteorización son:

- Tipos de roca matriz
  - Minerales integrantes.
  - Estado de cristalización.
  - Tamaño y forma de los materiales.
  - Unión entre los mismos.
  - Naturaleza del cemento de unión.
- Fracturación (fallas, fracturas, diaclasas)
- Estructura de matriz rocosa (en masas, estratificadas, plegadas).
- Actividad biológica (hombre, animales y plantas).
- Topografía del terreno (drenaje, grado de insolación).



- Clima (precipitación y temperatura).
- Tiempo de exposición a la meteorización (días, años, etc).

Clasificación de las rocas meteorizadas para uso de la ingeniería:

- Inalteradas
  - Sin señalización de alteración visibles
  - Roca fresca
  - Cristales brillantes
- Rocas levemente alteradas
  - Leve meteorización en fisuras o discontinuidades
  - Leve coloración en discontinuidades o en superficie
- Rocas moderadamente alteradas
  - Leve coloración en toda la masa
  - La roca en general no se disgrega
- Rocas altamente alteradas
  - La alteración alcanza toda la masa
  - Se disgrega parcialmente
  - Todo el material está coloreado excepto el cuarzo
  - Se excava fácilmente con el martillo del geólogo
- Roca completamente alterada
  - Roca completamente teñida, descompuesta y disgregada
  - Solo fragmentos mantienen textura y estructura
- Suelo residual
  - Desintegración y disgregación completa: suelo

La meteorización de una roca es un proceso irreversible cuyo ritmo de avance es muy variable, pudiendo ser alterado mediante ciertas acciones que en ningún caso hacen que la piedra vuelva a su estado primitivo.

El mejor procedimiento es evidentemente el preventivo cuando aún la meteorización no se ha producido o lo ha hecho de forma muy leve.

#### 4.6.1. Tratamiento de rocas alteradas

La meteorización de una roca es un proceso irreversible cuyo ritmo de avance es muy variable, pudiendo ser alterado mediante ciertas acciones. Los principales tratamientos de la piedra son:

- **Tratamiento de la piedra** (o movimiento) fuera del ambiente agresivos.
- **Limpieza**
  - Métodos mecánicos. Chorro de agua, cepillado, agua – aire.
  - Métodos químicos. Detergentes.

- **Reconstrucción**

- Hidróxido de bario.
- Dióxido de silicio.
- Impregnación (siliconas para cementar; impermeabilizar con productos acrílicos y resinas epóxicas).

- **Sustitución de la piedra alterada**

- Con bloques, sillares... a ser posible de la misma cantera.

#### 4.6.2. Influencia de las rocas alteradas en ingeniería civil

La presencia de alteración puede obligar a profundizar en la cimentación, lo que implica una mayor excavación, en volumen a retirar mucho mayor y su consiguiente transporte a vertedero, una posible necesidad de sostenimiento del hueco abierto y un mayor gasto de la propia cimentación al tener que utilizar más hormigón.

En una obra subterránea las complicaciones que puede presentar la presencia de zonas alteradas son múltiples, desde mayores sostenimientos y revestimientos a venidas de agua y retrasos en la ejecución. En una cantera la presencia de alteración puede llegar a invalidarla, a tener que cambiar el esquema de explotación o a necesitar un tratamiento del material obtenido para eliminar la roca alterada.

En excavaciones superficiales puede dar lugar a deslizamiento y obligar a sostenimientos que encarezcan notablemente la obra; los taludes en muchos casos deberán ser más tendidos que en caso de tratarse de roca sana, lo que implica un mayor costo de excavación y expropiaciones.

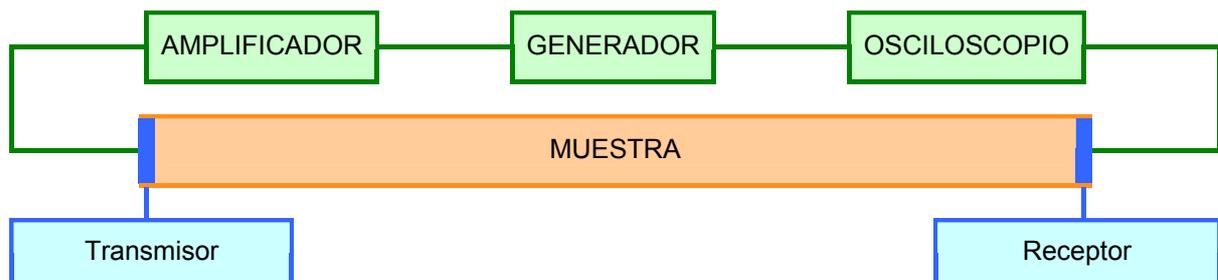
#### 4.7. VELOCIDAD DE ONDAS ELÁSTICAS

Es como si estudiásemos la transmisión de un terremoto en el material.

- **Ondas longitudinales P (primae).** El desplazamiento de las partículas es en la misma dirección que la propagación.
- **Ondas transversales S (secundae).** El desplazamiento de las partículas es normal a la dirección de propagación.

La velocidad de propagación viene condicionada por la densidad, porosidad, fracturación, etc. de la roca.

Para calcular la velocidad de las ondas elásticas usamos el método de la resonancia y el método de la pulsación ultrasónica.





En función de la velocidad de las ondas podemos definir el módulo elástico del suelo o el coeficiente de Poisson:

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{1-\nu}{0.5-\nu}$$

$V_p$  = velocidad de onda longitudinal  
 $V_s$  = velocidad de onda transversal  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson

Conocer el módulo elástico dinámico viene dado por el coeficiente de Poisson y la velocidad de la onda longitudinal:

$$E_d = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

$\rho$  = densidad de la roca  
 $E_d$  = módulo elástico dinámico

#### 4.8. RELACIÓN ENTRE ALGUNOS PARÁMETROS DE LAS ROCAS

La **densidad** es la relación entre la masa y el volumen.

Densidad aparente	$\rho_a = \frac{M_s}{V}$	$M_s$ : masa del sólido $M_w$ : masa del agua de los huecos $V$ : Volumen total $V_s$ : Volumen del sólido $V_v$ : Volumen de huecos $V_h$ : Volumen de huecos accesibles $V_i$ : Volumen de huecos inaccesibles $W$ : contenido de agua en %
Densidad verdadera	$\rho_v = \frac{M_s}{V_s + V_i}$	
Densidad absoluta	$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$	
Densidad húmeda	$\rho_h = \frac{M_s + M_w}{V}$	
Densidad saturada	$\rho_{sat} = \frac{M_s + V_h \cdot W}{V}$	

La densidad se puede hallar por el método del picnómetro.

Peso específico:  $\gamma = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}}$

Porosidad:  $n = \frac{V_v}{V} \cdot 100$

Índice de huecos:  $e = \frac{V_v}{V_s}$

Grado de saturación:  $S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$

Contenido en agua:  $W = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100$



#### 4.9. CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

##### 4.9.1. Clasificación de Deere y Miller

Esta clasificación está realizada en base a dos criterios: el módulo de resistencia elástico tangencial y la resistencia a compresión.

##### 4.9.2. Clasificación de Turk y Dearman

Resistencia a la compresión simple y la relación entre el módulo elástico tangencial y el módulo de Poisson.

##### 4.9.3. Clasificaciones geodinámicas más utilizadas

- Terzaghi
- Lanffer
- RQD (Rock quality design)
- RSR (Rock structure rating)
- RMR (Rock mass rating = más utilizado). Resistencia de la roca sana, alteración diaclasas, presencia de agua, rumbo de las diaclasas
- Q sistema (índice de calidad)
- Louis
- Clasificación en función de la velocidad longitudinal de onda.

Todas estas clasificaciones permiten dimensionar el túnel.

#### 4.10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

- Agua
  - Permeabilidad
  - Porosidad
- Excavaciones
  - Desgaste de herramientas
  - Consumo de explosivos
  - Posibilidad de machaqueo
  - Ripabilidad
- Sostenimiento
  - Taludes
  - Trincheras y canales
  - Túneles
  - Presas
- Terraplenes
- Pedraplenes y escolleras



- Capacidad portante
- Estabilidad
- Paisaje y morfología

Usos más frecuentes:

- Grandes bloques: escolleras, pedraplenes, puertos.
- Bloques medianos: sillares, puentes, edificación.
- Bloques pequeños: adoquines, balasto, hormigón, filtros, mezclas asfálticas.
- Tamaño arena: mortero, hormigones, filtros.
- Tierras: presas, terraplenes, subbases.



## 5. DISCONTINUIDADES DEL MACIZO

### 5.1. TECTÓNICA Y GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La **tectónica** estudia los procesos de translación y deformación de los materiales de la corteza terrestre a todas las escalas: tectónica global y microtectónica.

Las **zonas orogénicas** son las zonas que han sufrido deformaciones a escala global, en los bordes de las placas mediante energía mecánica o térmica (Alpes, Pirineos, Himalaya). La **orogenia** es el conjunto de fenómenos tectónicos que dan lugar a una cadena montañosa.

Los **escudos** o **cratones** son zonas que han permanecido inactivas a lo largo de la historia geológica. Son zonas rígidas y frías formadas por rocas ígneas y metamórficas. Forman grandes llanuras.

El **ciclo orogénico** es la historia evolutiva de las deformaciones sufridas por una zona montañosa desde su origen y a lo largo de la historia geológica.

- Precámbrico
  - Huroniana
  - Careliana
- Paleozoico
  - Caledoniana (Cámbrico – silúrico)
  - Herciniana (Devónico – Pérmico)
- Cenozoico
  - Alpina

### 5.2. TEORÍAS OROGÉNICAS

Explican los mitos de la corteza terrestre y la formación de las montañas.

- Teoría de los geosinclinales (Hall 1859)
- Teoría de la deriva continental (Wegener 1915)
- Teoría de la tectónica de placas (Wilson, Hess, Dewey, Hallan, Benioff,... 1956)
  - Dársenas oceánicas
    - Doble cadena montañosa (Dorsal) y una valle entre ellas.
  - Expansión del fondo oceánico (Hess 1960)
    - A lo largo de los valles del Rift sale material magmático.



- Placas litoesféricas

Los bordes pueden ser:

- Constructivos: Dorsales.
- Pasivos: fallas transformantes.
- Destructivos: Zonas de Benioff.

La **zona de succión** es donde la corteza oceánica se hunde bajo los bordes continentales, los materiales de la corteza terrestre retornan al manto.

La actividad sísmica, volcánica y orogénica justifica la destrucción de la corteza terrestre.

La **geodinámica interna** estudia los fenómenos que tienen lugar en el interior de la corteza terrestre y los resultados que de ella se derivan (orogénias, vulcanismo, terremotos).

La **geología estructural** estudia la disposición de los materiales como resultado de la dinámica que tiene lugar en el interior de la corteza terrestre.

El comportamiento de los materiales de la corteza terrestre cuando actúan los fenómenos dinámicos internos depende de los siguientes factores:

- Presión
  - Litoestática. 250 Kg/cm<sup>2</sup> cada km.
  - Orientada. Empujes orogénicos.
  - Zonas de subducción. Intraplana.

A presiones altas, los materiales se comprimen y se vuelven más plásticos.

- Temperatura
  - Cada 33m la temperatura aumenta 1°C.
  - Deformaciones mecánicas. Rozamiento.
  - Intrusiones magmáticas.
  - Reacciones elementos radioactivos.

A temperaturas más altas, los materiales se vuelven más plásticos.

### 5.3. LA DEFORMACIÓN DEL MATERIAL DE LA CORTEZA TERRESTRE

Las deformaciones son la respuesta a los esfuerzos a que son sometidos en los periodos de actividad orogénica. Una roca bien consolidada tenderá a romperse, mientras que un material dúctil y poco competente se plegará.

La **anisotropía** es la variación de la resistencia con las direcciones debido a la orientación de los cristales.

Debido a estos factores los materiales de la corteza terrestre sufren deformaciones.

Tipos de deformaciones:

- **Deformación plástica.** Rebote elástico en el epicentro de un terremoto. Recupera su estado después de cesar su deformación (Ondas sísmicas, mareas terrestres).



- **Deformación frágil.** Se produce una fractura con mucha facilidad.
  - **Fallas.** Normales, inversas, transformantes.
  - **Diaclasas.** De contracción y distensión. Tensiones compresibles.
- **Deformación frágil y dúctil.** Deformaciones mecánicas en frío acompañadas de una rotura. Pliegues, fallas, cabalgamientos, mantos.
- **Deformación dúctil.** Grandes deformaciones mecánicas sin producirse la rotura.
  - Pliegues concéntricos
  - Pliegues similares (esquistosidad)
- **Deformación viscosa.** Aquella que se comporta como un fluido con una velocidad diferente en función de la viscosidad.
  - Pliegues de flujo viscoso
  - Domos gnésicos
  - Diapiros salinos

#### 5.3.1. Diaclasas

Una **diaclasa** es la fractura con cierta separación por tracción, compresión o disolución. Se definen por su orientación, esponjamiento, continuidad, forma, apertura, relleno y rugosidad. Llevan consigo un estudio estadístico. Direcciones principales de fracturación (vías de agua, excavación).

Las diaclasas no suelen presentarse aisladas sino agrupadas con direcciones y buzamientos similares formando familias o sistemas. Suelen ir ligadas a otro tipo de deformaciones como las fallas y los pliegues.

Un sistema de fracturas pueden tener gran influencia en realizaciones de ingeniería civil, ya que presenta una zona de debilidad en el macizo, tanto en su resistencia como en su permeabilidad; de ahí el interés que puede tener para el proyectista y constructor conocer lo más a fondo posible las características de las familias de roturas.

Las características principales que definen una fractura son las siguientes: orientación, espaciamiento, continuidad, forma, apertura, relleno y rugosidad. Para estudiar una fractura se la suele asimilar a un plano, aunque en la realidad esto no es en muchos casos cierto, pues presentan superficies muy alabeadas.

La **orientación** es la situación de la fractura en el espacio y se expresa mediante la dirección o rumbo y el buzamiento. Se define como **dirección** el ángulo que forma la recta intersección del plano de fractura con el plano horizontal (horizontal del plano), con el norte magnético, y como **buzamiento**, el ángulo que forma un plano de fractura con el plano horizontal (ángulo de máxima pendiente).

El **espaciamiento** es la distancia perpendicular existente entre dos fracturas contiguas pertenecientes a la misma familia. Da una idea de la densidad con que se presenta cada familia en la zona estudiada y por extensión, la calidad del macizo en ese lugar. Normalmente se suele dar un valor medio de espaciamiento.

El conocimiento del espaciamiento de las distintas familias presentes en un macizo nos sirve para determinar el tamaño de bloque que se formará a favor de ellas, lo cual nos permitirá definir el tratamiento a dar a la zona de nuestra obra que esté situada en ese macizo.



La **forma** más general que presentan las diaclasas es la de una superficie próxima a un plano, aunque no es extraño que aparezcan fracturas de forma extremadamente alabeadas. Para cualquier estudio que se haga hay que prescindir de los casos especiales y suponer planos.

La **apertura** es la distancia existente entre las partes separadas por el plano de fractura.

En numerosas ocasiones las fracturas muestran un **relleno** de naturaleza diversa, que puede tener una influencia acusada en el comportamiento del macizo. En muchos casos las fracturas suelen encontrarse rellenas de materiales de alteración, ya sea por descomposición de la propia roca ya sea porque hayan sido situados allí por las aguas

La **rugosidad** del plano de rotura tiene una influencia decisiva en el esfuerzo a cortante, que se desarrolla cuando uno de los labios de la fractura está sometida a un esfuerzo, especialmente cuando se trata de una discontinuidad limpia.

Es evidente la importancia que tiene la fracturación en la ejecución de una obra. En principio, su existencia supone una alteración de la masa rocosa, tendente a debilitarla y rebajar su resistencia. Su influencia está en función de su densidad, disposición respecto a los esfuerzos que actúan, rellenos que pueden presentar, posición de la obra, etc.

En excavaciones superficiales de grandes dimensiones, cimentaciones, carreteras, canales, ferrocarriles, etc., es evidente que la existencia de familias de roturas puede dar lugar a deslizamientos importantes, que obligue a tratamientos costosos (anclajes, cubrición con gunita, muros) y sobreexcavaciones no previstas.

En excavaciones subterráneas, túneles o cavernas la presencia de fracturación es un factor importante en la marcha de la obra. Las zonas con densa rotura son puntos débiles que obligan a una excavación cuidadosa y a posteriores revestimientos, en algunos casos de envergadura.

Si uno de los sistemas de fracturación es claramente dominante sobre el resto de las familias presentes, convendrá que el eje del túnel o la dimensión mayor de la excavación subterránea sea normal a esa dirección de fracturación. En el caso de dos sistemas de fracturas de similar densidad, el eje se situará en la bisectriz del ángulo definido por los rumbos de ambas familias.

Caso de que tal disposición no sea posible por imperativos de otro tipo, hay que huir siempre de coger las fracturas al hilo.

Cuando la investigación de una obra subterránea no se ha llevado a las zonas profundas donde se emplaza la excavación, la extrapolación de los datos exteriores puede inducir a error. Lógicamente, las fracturas tienden a cerrarse en profundidad, pero en rocas con tendencia a la disolución o alteración pueden producirse sorpresas.

Un efecto secundario, desde el punto de vista de la ingeniería civil, de la fracturación en la homogeneidad y resistencia del macizo, es la de servir de vía de alterabilidad de la roca. En materiales como el granito y demás ígneas la descomposición y degradación de las propiedades geomecánicas se produce a través de las fracturas debido a las aguas que circulan por ellas. Así, las zonas de cruce de dos sistemas son las que presentan una mayor alteración.

Para la ubicación de una obra, especialmente si es subterránea, se deben evitar em principio las zonas que presenten superficialmente una fracturación densa.

La presencia de fracturación, unido a la acción del hielo y del agua, crea al pie de los cantiles, especialmente en las cimas, grandes pedreras. Estas zonas en algunos casos pueden servir de aprovechamiento para escollera y áridos con apenas transformaciones posteriores. Sin embargo presentan grandes problemas debido a su inestabilidad, para la ubicación de estructuras, especialmente de carácter lineal cuyo paso por estas áreas viene obligado en muchos casos por el



trazado de los tramos adyacentes. En ocasiones es preciso hacer variantes en túnel para evitar el paso por tales formaciones, evitándolas, por supuesto en los emboquilles.

### 5.3.2. Fallas

Una **falla** es la rotura de la roca a lo largo de la cual se producen movimientos relativos. En una falla hay que considerar los elementos siguientes:

El **plano de falla** que es el plano de rotura y se define por su dirección y buzamiento, al igual que se ha dicho al hablar de las diaclasas. No siempre una falla es un plano perfectamente definido; por lo general depende del tipo de rocas a ambos lados de la falla, después del plano de falla sensu estricto y posible relleno; los bordes de los bloques separados presentan roturas diversas y alteración, hasta tal punto que puede haber desaparecido todo rastro de estructura geológica. Según nos vamos alejando de la falla, mejora paulatinamente el estado de la roca. Por ello, en ocasiones, más que hablar de falla o plano de falla habría que considerar una **zona de falla**.

En muchas ocasiones las fallas con salto grande suelen ir acompañadas de otras menores paralelas a ellas.

El conjunto formado por la falla principal, las asociadas, las fracturas relacionadas con el callamiento y los posibles rellenos constituyen la **zona de falla**, que puede ser muy reducida o alcanzar un gran espesor.

Al igual que en las fracturas, en las fallas se encuentran rellenos. Estos suelen estar constituidos por material fragmentado más o menos cementado con espesor variable, que recibe el nombre de **brecha**, fragmentos angulosos de roca de tamaño grueso o medio cementados por una matriz de materiales más finos, o **milanito**, constituido por polvo de roca o roca triturada finamente cementado por una matriz, que presenta veteado o laminación.

Los bordes de dos bloques de roca individualizada de una falla reciben el nombre de **labios**, elevado el que ha ascendido en el movimiento relativo a ambos, hundido el que ha bajado. También se suele definir como techo y piso a los bloques situados por encima y por debajo de la falla respectivamente.

La distancia medida sobre el plano de falla entre dos puntos situados en los labios, que antes del movimiento coincidían, se conoce como **salto real** o **salto neto**. La distancia entre dos partes de un estrato separadas por la falla se llama **separación**.

El movimiento de una falla puede ser enormemente complejo y haberse producido en etapas distintas. Si a esto se une la acción erosiva que tiende a unificar la superficie, se comprende que sea muy difícil encontrar puntos cuya situación antes y después del movimiento sea conocida. Por ello resulta problemático medir el salto de una falla. En la práctica, los valores que suelen darse como salto es la separación, medida en la intersección del plano de falla con aquel en el cual se está estudiando la discontinuidad.

La influencia de una falla sobre una estructura puede considerarse doble: una directa, derivada de su presencia en el emplazamiento y otra indirecta resultante de la acción de terremotos generados en una falla activa.

En términos generales una falla representa una zona de debilidad en el macizo, lo cual implica una serie variada de problemas: un posible cambio del tipo litológico y un camino para filtraciones o surgencias de agua.

Por lo general, la presencia de una falla vertical en una cimentación, salvo que presente un relleno de muy mala calidad y gran anchura o se trate de un apoyo puntual, no suele implicar un problema grave.



Mayor incidencia tiene la presencia de una falla en una excavación de un talud o los estribos de una presa, ya que puede dar lugar a cuñas inestables que necesitarán ciertas correcciones a base de anclajes, cubrición con gunita o incluso eliminación.

En una obra subterránea, si ésta atraviesa una falla los problemas que se produzcan dependerán de la importancia de la discontinuidad. Evidentemente influyen sobremanera la forma de cruzarla, es decir, el ángulo que formen la dirección de la falla y el eje de la estructura. La brecha y los labios más o menos fracturados representan zonas de mayor debilidad que requerirán un tratamiento de excavación más delicado que otros tramos y evidentemente revestimientos especiales. Suele ser corriente el uso de cerchas ya que los bulones pueden trabajar mal si el relleno es muy brechítico o de material arcillo – arenoso.

Por lo general el cruce de una falla obliga a una sección algo mayor que la necesaria, tanto para colocar los revestimientos como para prever las fuertes convergencias que pueden producirse disminuyendo notablemente la sección teórica. Los procedimientos para atravesar la zona de falla son los usualmente utilizados en las zonas de roca alterada.

Una obra subterránea, aunque no se vea afectada directamente por una falla, puede verse influida por su proximidad. No debe olvidarse que una falla es una zona descomprimida cercana a la apertura realizada, en la cual los trabajos de extracción dan lugar también a descompresiones. La suma de ambos efectos provoca desprendimientos y sobreanchos cuya posición en la excavación dependerá de la situación relativa estructura – falla.

No siempre una falla influye negativamente en una obra. En ocasiones puede ser provechosa.

### 5.3.3. Fallas y terremotos

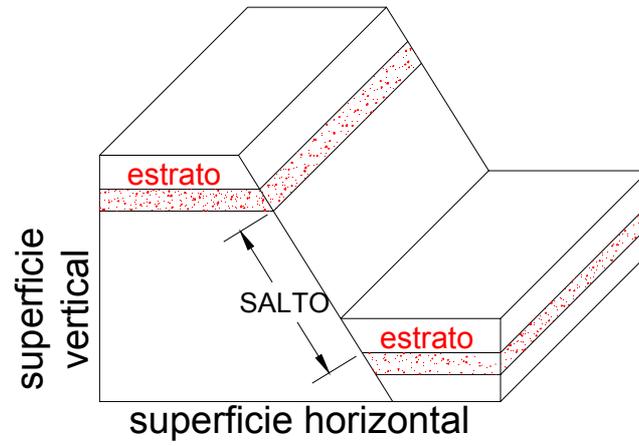
Otra forma de influir una falla sobre una estructura son los terremotos. Ya se indicó al hablar de placas tectónicas cómo en sus bordes se producían terremotos debidos a la fricción existente entre ellas.

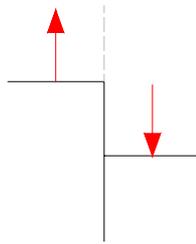
No todos los terremotos están ligados a las grandes líneas de fracturación. En muchos casos son debido a movimientos de fallas de menor importancia, algunas relacionadas con los bordes de placa, con hundimientos provocados por disoluciones en zonas de yesos y sales o con grandes deslizamientos de ladera.

El terremoto se produce por la liberación brusca de la energía acumulada en una falla sometida a tensiones. En el momento de desplazarse los labios de la falla, al superar las resistencias que impide el movimiento, se produce un auténtico “mazazo” que libera energía en forma de calor y ondas elásticas. Estas última son las causantes del terremoto.

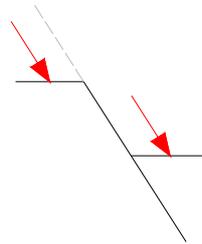
La sismicidad que puede afectar a un emplazamiento obliga al análisis de los terremotos que se han producido en la región circundante y de las fallas consideradas activas.

Los elementos de una falla se pueden ver gráficamente:

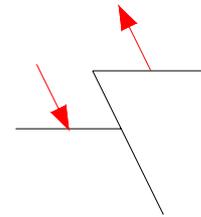




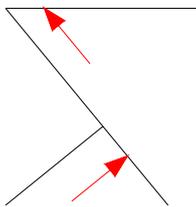
Vertical



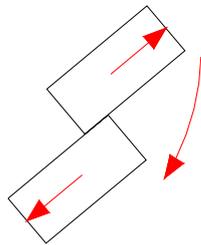
Directa Normal (Distensión)



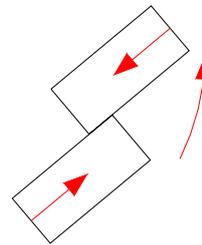
Inversión (compresión)



Cabalgamiento  
 $\leq 10^\circ$

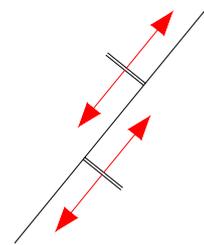


Dextral



Sinistral

Desgarre



Transformante

En tijera

Cilíndrica

Cónica



#### 5.3.4. Pliegues

Un **pliegue** es la respuesta de una roca no competente antes los esfuerzos a los que ha sido sometida. Se trata de una deformación dúctil. Los materiales pasan de una situación inicial horizontal o próxima a una posición inclinada o curvada.

La **charnela** es la zona de máxima curvatura; la **cresta** es la zona más elevada del pliegue, que no tiene porque coincidir con la charnela; la **superficie axial** es la definida por todas las líneas de charnela; los **flancos** son los laterales del pliegue; el **núcleo** es la parte interna del pliegue. La **inmersión** es el ángulo que forma la línea de charnela con el plano horizontal; la **vergencia** es el ángulo de buzamiento del plano axial. La **amplitud** de un pliegue se define de igual manera que la amplitud de una onda y es la distancia vertical entre la cresta o punto culminante y un surco.

Hay dos denominaciones de pliegues, se trata de las denominaciones de sinclinal y anticlinal, a las que suele dárseles una acepción geométrica, cuando realmente es estratigráfica. Se debe entender como **anticlinal** el pliegue en cuyo núcleo aparecen los terrenos más antiguos (montaña), y **sinclinal** la forma cuyo núcleo está constituido por las deformaciones más modernas (valle).

Es normal que una estructura se asiente sobre el flanco de un pliegue y que ese flanco a su vez presente ondulaciones más o menos acentuadas. Lo que no suele ser tan corriente es que la forma completa del pliegue afecte en su totalidad a la estructura.

Evidentemente las zonas peores para emplazamiento son las charnelas y el núcleo. Su mayor fracturación y las tensiones a que están sometidas hace que se trate de puntos de menor resistencia y mayor posibilidad de filtraciones. En obras de carácter lineal conviene evitarlas llevarlas al hilo del eje del pliegue por las mencionadas zonas, y cruzarlas, caso de que sea preciso, lo más normalmente que lo permita su trazado. En emplazamientos puntuales por supuesto no deben situarse la estructura en las dos zonas señaladas.

Para obras subterráneas son válidas las recomendaciones anteriores. Las mayores tensiones "in situ", existentes en las dos zonas dichas, hace que las deformaciones que pueden producirse sean mayores. Además, en las formas cóncavas (valle), especialmente cuando alternan materiales de permeabilidad muy diferente, se pueden formar acumulaciones de agua que impidan o resulten molestas para el desarrollo de los trabajos; en estos casos habrá que estudiar un drenaje conveniente o los medios de achique precisos. Cuando la obra es subterránea el problema es más complicado. Dependiendo de la situación del acuífero, las venidas de agua pueden ser súbitas o demorarse mucho en el tiempo.

Es necesario investigar el caudal de estas filtraciones, ya que su incidencia en el desarrollo de la obra puede ser muy importante, pues pueden paralizarla durante un periodo largo de tiempo, aminorar el ritmo de trabajo y obligar a utilizar elementos de sostén y achique que encarecen la construcción.

La ubicación de una estructura generalmente, conviene situarla de forma que su eje o dimensión mayor sea lo más normal la dirección de los estratos, por tanto es recomendable huir de las posiciones al hilo de las capas.

#### 5.3.5. Clasificación geométrica de los pliegues



Geométrico.  $V = 0$

Inclinado.  $V \leq 45^\circ$

Acostados.  $V > 45^\circ$

Enconfrados doble

Monoclinal no definido



#### 5.3.6. Mantos de corrimiento

La conjunción de un pliegue y una falla da lugar a un pliegue roto conocido como pliegue falla. Si el buzamiento de la falla es suave y el movimiento importante, una parte del pliegue descansa sobre la otra, de tal forma que terrenos más antiguos se apoyan sobre los más modernos. Esta estructura recibe el nombre de **cabalgamiento**. Cuando el cabalgamiento tiene una gran amplitud (kilómetros) se le da el nombre de manto de corrimiento.



## 6. AGUA EN EL MACIZO

### 6.1. INTRODUCCIÓN

En el macizo, además de la matriz rocosa y la fracturación, hay que considerar otro elemento: el agua que llena los huecos. Si el agua que empapa el macizo tiene un lado positivo, su obtención para abastecimiento, riego, etc., aspecto marginal para la ingeniería civil, incide de forma negativa cuando altera las características mecánicas de los materiales o entorpece los trabajos, tanto superficiales como subterráneos. La presencia de agua puede disminuir la cohesión de determinadas rocas, provocar su disolución, alteración o hinchamiento, dar lugar a presiones que alteren el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre el macizo, etc. Por todo ello en múltiples ocasiones el ingeniero civil se ve obligado a paliar sus efectos e incluso a su total eliminación, tarea en muchos casos nada fácil y bastante costosa.

En otras situaciones la permeabilidad del terreno será un factor primordial a tener en cuenta independientemente de que exista agua en el macizo, pues el ingeniero necesitará que el terreno sea un medio receptor o por el contrario presente una gran permeabilidad.

### 6.2. EL CICLO DEL AGUA. BALANCE HÍDRICO. ACUÍFEROS

El agua está en el terreno de varias formas:

- Agua retenida por fuerzas no capilares. Debido a la atracción eléctrica en la superficie de los granos.
- Agua retenida por capilaridad. Ocupa una zona irregular por encima de la zona saturada y rellena los huecos por capilaridad.
- Agua de gravitación. Agua que ocupa los poros y fisuras del macizo y puede circular.

De esta agua, únicamente la última, que se presenta con volumen importante, es la que puede influir en los trabajos de ingeniería civil que se realizan en el macizo o es la que puede utilizarse extrayéndola.

El agua existente en el terreno procede de la precipitación. Una parte del agua que cae sobre la superficie corre a través de los barrancos, arroyos y ríos (escorrentía) hasta acumularse en lagos y mares. Otra parte se infiltra en el terreno (infiltración).

La cantidad de agua existente es invariable y podrá expresarse de la forma siguiente:

$$P = E + EVT + I - R$$

En donde P es la precipitación; E es la escorrentía; EVT es la evotranspiración; I la infiltración y R la reserva existente en los acuíferos.

El agua infiltrada en el terreno se acumula dentro de él aprovechando los poros de la matriz rocosa (porosidad primaria) o los huecos de las discontinuidades (fracturas, fallas), tanto abiertas como rellenas de material poroso y en casos agrandadas por disolución (porosidad secundaria). Dentro del terreno el agua también puede moverse (escorrentía subterránea) saliendo a la superficie o bajo un manto de agua en ríos, lagos o el mar.

La zona saturada por el agua constituye un **acuífero** cuyo techo, que está a la presión atmosférica, se conoce como **nivel freático**. Por encima del nivel freático suele existir una franja de terreno saturado por capilaridad cuyo espesor depende de la finura de las partículas que constituyen el terreno.



En un macizo no tiene porqué existir un solo freático, pues puede estar constituido por varias capas permeables separadas por otras impermeables, de forma que cada una de aquellas recoja aguas. El acuífero cuyo techo es el nivel freático se denomina **acuífero libre**, mientras que el situado entre capas impermeables se le da el nombre de **acuífero confinado**.

En algunos casos, en pozos excavados en un acuífero confinado, las aguas salen a presión y rebasan la boca del pozo recibiendo el nombre de pozos artesianos.

El nivel que alcanzan las aguas en un pozo artesiano marcará la presión del agua en el acuífero confinado y es conocido como nivel freático piezométrico. Su expresión respecto a un plano de referencia es:

$$h = z + \frac{p}{\gamma_w}$$

Donde h es el nivel piezométrico del punto; z es la altura del punto con respecto al plano de referencia y  $\gamma_w$  es el peso específico del agua.

Cuando en el acuífero no hay circulación, el nivel piezométrico es el mismo para todos los puntos. El nivel piezométrico se mide con unos dispositivos que se denominan piezómetros.

### 6.3. PERMEABILIDAD. TRANSMISIBILIDAD

La porosidad eficaz es:

$$n_e = \frac{V_h}{V_t}$$

Donde  $n_e$  es la porosidad eficaz;  $V_h$  el volumen de huecos de la muestra ocupado por el agua que es posible extraer del material por gravedad y  $V_t$  el volumen total de la muestra.

La ley de Darcy nos indica que:

$$v = k \cdot i$$

En donde v es la velocidad de flujo o velocidad Darcy; k es un coeficiente de proporcionalidad, característico de cada terreno que se denomina permeabilidad o coeficiente de permeabilidad e i es el gradiente hidráulico, cuyo valor es:

$$i = \frac{h_2 - h_1}{l}$$

Siendo  $h_2$  y  $h_1$  la columna de agua en dos puntos de la muestra del ensayo y l la longitud entre ellos.

El coeficiente de permeabilidad será por tanto:

$$k = \frac{v}{i}$$

Hay que señalar que la velocidad con que se mueve el agua en el terreno es variable y depende del tamaño y orientación de los poros (porosidad eficaz), y distinta a la velocidad de flujo (la velocidad real es mayor), relacionándose según la fórmula:



$$v = n_e \cdot v'$$

El caudal de flujo que atraviesa una sección es:

$$Q = v \cdot s$$

Siendo  $v$  la velocidad de flujo y  $s$  la sección.

Sustituyendo  $v$  por el valor obtenido en la fórmula de Darcy se puede escribir:

$$Q = k \cdot i \cdot s = k \cdot s \cdot \frac{\Delta h}{l}$$

El caudal que atraviesa un terreno está en función de la permeabilidad que tenga el terreno. Igualmente el agua que puede escaparse de una presa a través del terreno dependerá de esa propiedad, o cuando se quiera rebajar el nivel freático, para poder trabajar bajo él, decidir qué bombas se emplearán estará en función del caudal que proporcione el acuífero, es decir, de la permeabilidad.

Otro concepto ligado a un acuífero es la **transmisibilidad**, que es el caudal que se filtra a través de una faja vertical de terreno, con anchura unidad y altura igual a la de la capa permeable saturada (m), bajo un gradiente hidráulico igual a uno, a una temperatura fija. El valor de la transmisibilidad es igual a la permeabilidad por el espesor del acuífero.

$$T = k \cdot m$$

## 6.4. MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD

### 6.4.1. Medida de la permeabilidad en el laboratorio

La medida de permeabilidad en el laboratorio se hace mediante permeámetros que pueden ser de dos tipos: de carga fija y de carga variable.

En los primeros se mantiene la carga añadiendo un caudal similar al que se descarga a través de la muestra. En los segundos la carga va variando al producirse la salida de agua.

### 6.4.2. Ensayos "in situ" de la permeabilidad

Vamos a ver uno de los muchos tipos de métodos que existen para averiguar la permeabilidad "in situ", la medida de la permeabilidad en el fondo del sondeo.

El ensayo consiste en añadir un caudal determinado para mantener un nivel de agua constante dentro del taladro.

A este tipo de ensayos pertenece el **ensayo Lefranc**, consistente en hacer una cavidad aislada en el fondo del sondeo, la cual se llena de agua, midiendo:

- El descenso del nivel del agua.
- El caudal necesario para mantener el nivel, es decir, a carga variable o carga constante similar a lo dicho en los ensayos de laboratorio.

## 6.5. EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS DEL MACIZO

El evitar que el agua afecte en mayor medida a una estructura o a su construcción puede llevarse a cabo de formas diferentes: eliminando el agua o rebajando el nivel freático mediante un drenaje



por gravedad o por bombeo, aislando la estructura mediante pantallas, congelando el terreno y tratándolo para hacerlo impermeable.

## 7. ROCAS ÍGNEAS

### 7.1. DEFINICIÓN

Son rocas que se han formado por cristalización o solidificación del magma (ácido si es con SiO<sub>2</sub> o básico sin SiO<sub>2</sub>) por enfriamiento.

Se clasifican así:

- **Endógenas intrusivas.**
  - Plutónicas. Enfriamiento lento a gran profundidad.
  - Filonianas. Más rápido en grietas y fisuras cerca de la superficie.
- **Exógenas efusivas.**
  - Volcánicas.
    - Hipervolcánicas.
    - Subaéreas.
    - Submarinas.

### 7.2. MINERALOGÍA

Son silicatos y se clasifican en función de su color:

#### Minerales componentes de las rocas ígneas

	<b>Minerales leucocratos (claros)</b>	<b>Minerales melanocratos (oscuros)</b>
Esenciales	Cuarzo	Olivino
	Feldespatos Pertita Feldespatos calcosódicos	Piroxenos Augita, Egirina
	Feldespatoides	Homblenda Biotita
Accesorios	Apatito, Corindón, Esfena, Zircón, Moscovita, Fuorita	Ilmentita, Magnetita, Pirita, Pirrotina
Accidentales	Topacio	Turmalina, Granate

### 7.3. ROCAS PLUTÓNICAS

Son rocas formadas por la cristalización lenta de un magma silicatado que se introduce en la corteza.

El rasgo más habitual que presentan las rocas ígneas es el de aparecer en grandes masas aunque hay variantes de gran importancia como los cuerpos tubulares y las chimeneas.

#### 7.3.1. Masas subyacentes

Las estructuras de las rocas plutónicas suelen dividirse en grandes masas, cuerpos tubulares y chimeneas. Las grandes masas, llamadas masas subyacentes, suelen dividirse en **batolitos**, que tienen un gran volumen y área de afloramiento superior a los 100km<sup>2</sup>. Sus límites suelen ser empinados, irregulares y discordantes con las rocas encajantes. Cuando su extensión superficial es menor de los 100km<sup>2</sup> se le da el nombre de **cúpula**. Estas estructuras han salido a la superficie por acciones tectónicas y por la erosión de los materiales que las cubrían. Las masas subyacentes suelen estar constituidas usualmente por granitos y rocas afines.



### 7.3.2. Cuerpos tubulares

Los **cuerpos tubulares** se han formado por la inyección de materiales magmáticos en fracturas o interlechos de rocas sedimentarias o metamórficas. Según su forma se han dividido en diques, facolitos, alcoholitos y lopolitos.

El **dique** es una masa tabular discordante con las rocas encajantes que corta a las estructuras principales. Puede tener cualquier dimensión, desde unos centímetros hasta cientos de metros de anchura, y desde varios metros hasta kilómetros de longitud. Sus bordes suelen ser casi paralelos.

El **filón** es una intrusión entre estratos y paralela a ellos. Su dimensión es variable al igual que lo dicho antes para los diques.

El **facolito** es una intrusión en pliegues, adquiriendo la curvatura que éstos presenten.

**Lacolitos.** Son intrusiones concordantes con la boca encajante, cuyo contacto superior tiene forma de domo, debido a la flexión que se ha producido en las capas suprayacentes por la presión de la inyección. El contacto inferior es casi plano.

**Lopolitos.** Son intrusiones cuyo techo es plano y presentan un contacto inferior curvo hacia abajo. Son la consecuencia de la inyección de magmas máficos.

### 7.3.3. Chimeneas

Se trata de intrusiones discordantes, relativamente pequeñas y de formas cilíndricas, aunque pueden presentar ramificaciones.

Las distintas clasificaciones existentes son:

- **Nockold.** Basada en los minerales dominantes.
- **Streckeissen.** Ácidas y básicas.
- **Clasificación conjunta de las rocas ígneas.**

## 7.4. MATERIALES Y ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS

Un **volcán** es una montaña formada por materiales procedentes del interior de la tierra (magma), fundidos que salen por uno o más conductos en forma de lava, gases o piroclastos.

Los **gases** están fundamentalmente formados por agua.

Los **piroclastos** son fragmentos de material fundido que son lanzados a la atmósfera juntamente con los gases, y según su tamaño de menor a mayor se denominan cenizas (menos de 3 mm), lapillos (3 – 30 mm) y escorias (mayor de 3 cm).

Si los piroclastos al depositarse están fundidos, pueden aglomerarse formando una roca compacta conocida como toba volcánica. Este mismo proceso puede tener lugar cuando a través de estos piroclastos sueltos circula un fluido que los cementa.

La **lava** son los materiales fundidos que corren por la superficie, coladas o se acumulan en el punto de erupción.

**Lava ácida** es la que contiene  $\text{SiO}_2$ . Es muy viscosa y no fluye. Forma tapones y son frecuentes las explosiones.

**Lava básica** es la que tiene poco o nada de  $\text{SiO}_2$ . Es fluida y se extiende en grandes extensiones.



#### 7.4.1. Tipos de erupciones volcánicas

El tipo **hawaiano** es muy básico con lava muy fluida en la que hay extensas coladas y en la que no hay apenas explosiones porque los gases se liberan fácilmente. Se forman lagos de lava ardiente. Basaltos.

En el **Stromboliano** lava es básica con algo de  $\text{SiO}_2$ . La lava es más espesa que en el hawaiano y los gases proyectan lava al espacio, algunas “bombas” y “lapillo”. Se producen explosiones pequeñas con coladas reducidas.

En el **besubiano** la lava es ácida viscosa, no fluye y se solidifica pronto formando “costras”. Se producen explosiones de gases y nubes de ceniza.

En el **peleano** la lava es ácida y muy viscosa. Se solidifica en la menea y forma tapones. Salida de lava en forma de “pitón”. Fuertes explosiones y nubes ardientes.

Los **fisurales** contienen una lava muy básica y fluida que sale a través de grietas o fisuras, a veces de varios kilómetros. Cubren enormes extensiones con coladas basálticas.

En los **freáticos** la lava se mezcla con agua que se transforma en vapor. Se producen presiones muy altas. Las expansiones son terribles.

Los **submarinos** se producen en las dorsales oceánicas donde sale lava constantemente y produce la expansión del fondo marino. Engloba la mayor parte de las islas del pacífico y otros océanos. El enfriamiento es rápido con lavas almohadilladas poco cristalizadas. A veces se producen “islas efímeras” que desaparecen por explosiones.

#### 7.4.2. Manifestaciones póstumas

Se producen después del cese de la erupción de lava. Fumarolas y Geiseres.

Las **fumarolas** se clasifican por su temperatura y composición.

- Cloruradas. 800 – 400 °C.
- Ácidas. 400 – 200 °C.
- Alcalinas. 200 – 100 °C.
- Sulfatadas. 100 – 50 °C.
- Mofetas. < 50 °C.

Los **geiseres** consisten en la salida de agua y vapor de agua a elevada temperatura (380 °C). Se encuentran en las proximidades de volcanes apagados o postumos.

En la actualidad hay aproximadamente unos 50 volcanes en actividad o en fecha histórica. Se localizan en el cinturón de fuego en el pacífico. Coinciden con los bordes de placas importantes y con las zonas sísmicas.

#### 7.5. GRANITO Y ROCAS DE LA FAMILIA DEL GRANITO

El granito, para algunos autores, es la **roca más importante de la corteza terrestre**. Es el resultado final de procesos muy diversos. Realmente cuando se habla de granito, la palabra engloba una serie de rocas ricas en sílice, ácidas, que los petrógrafos han denominado de formas diversas, pero cuyo comportamiento y utilización en ingeniería civil son similares a la del granito y por lo tanto se consideran como tales.



#### 7.5.1. Composición mineralógica

Los minerales esenciales son **cuarzo, feldespato, ortosa y biotita**. El primero se presenta incoloro, aspecto de sal pero con brillo graso. La ortosa presenta coloración variable, blanca o rosada, y puede ser brillante o mate. La mica biotita aparece en láminas con brillo de color negro. Suele tener textura granítica o microgranítica con cristales visibles a simple vista. Suele ser corriente la presencia de inclusiones de minerales más oscuros, de textura microgranítica y de forma redondeada, conocidos comúnmente como “gabarros”.

#### 7.5.2. Alteración de las rocas graníticas

La alteración más importante que sufren es la **química**. Los minerales esenciales son transformados en mayor o menor grado. El cuarzo es prácticamente inalterable, pues es ligerísimamente soluble en agua por lo que la velocidad de reacción es excesivamente lenta, de tal forma que no se considera su alteración.

Los feldespatos bajo la acción del agua cargada de hidrógeno, dan lugar a caolín, un mineral arcilloso. Este proceso recibe el nombre de caolinización de los feldespatos. Los minerales ferromagnesianos como las micas sufren oxidación.

La alteración descrita produce la desintegración de la roca, por lo que es fácilmente erosionada por las aguas, el hielo, etc. El agua penetra en la masa de granito a través de las fracturas, y desde ellas la alteración progresa hacia el interior, acentuándose el proceso en el cruce de fracturas.

La descomposición sigue aumentando en las zonas alteradas, y el material pasa de roca ligeramente alterada a una roca muy modificada fácilmente disgregable (**jabre**).

La alteración se agudiza en zonas húmedas urbanas, donde existen atmósferas agresivas cargadas de ácidos provenientes de las calefacciones, los automóviles y las industrias, los cuales, unidos al agua, hacen que el proceso sea más rápido y virulento.

La presencia de granito alterado en un macizo de tal naturaleza, en el que se piensa asentar una obra o utilizar como material de construcción, puede tener un papel decisivo. En cimentaciones puede obligar a excavar más volumen de lo previsto, teniendo que rebajar el plano del cimiento, lo que puede implicar retrasos y mayor costo. En el caso concreto de una presa, si el producto resultante de la alteración no contiene mucha arcilla, al problema de posibles asentamientos se añade la falta de estanqueidad, lo que obliga a retirar el material o mejorarlo.

En excavaciones tanto superficiales como subterráneas, la alteración da lugar a desprendimientos, sobreanchos o caídas de bloques y cuñas, despegados por las fracturas rellenas de arcillas u otros materiales de alteración.

En canteras la alteración puede ser motivo del rechazo del emplazamiento, ya que el conjunto mineral extraído se encuentre mezclado con productos de alteración, lo que obliga a seleccionar y lavarlo.

#### 7.5.3. Utilización y comportamiento del granito

##### *Árido para hormigones*

El árido obtenido del granito sano es resistente, de superficie rugosa y con buena adherencia con el cemento. Debe evitarse el granítico gneísico por la tendencia a dar fragmentos lajosos.



El granito ligeramente alterado puede dar lugar a presencia de mica y algo de caolín, que obligaría al lavado de material. Debe desconfiarse de las arenas naturales procedentes de granito, pues suelen tener exceso de caolín.

#### *Balasto y macadam*

Tanto para balasto como para firme de carretera los granito dan un buen resultado, pero para el primer uso se deben emplear microgramitos. El desgaste del granito cuando está sano es mínimo, pero puede llegar a ser elevado cuando está alterado.

#### *Escolleras*

La densidad elevada del granito, su alta resistencia al desgaste, así como la posibilidad de obtener bloques de gran tamaño lo hace un material ideal para diques de puerto. Lógicamente debe rechazarse la roca que presente alteración.

#### *Cimentación*

El granito es una roca magnífica para la sustentación de cualquier tipo de estructura, pues tiene una levada resistencia a compresión. Cuando se trate de estructuras importantes, debe explorarse la posible existencia de fracturas de descompresión.

#### *Embalses*

El granito es una roca impermeable, de forma que los embalses situados en este tipo de terreno deben considerarse impermeables.

#### *Excavaciones a cielo abierto*

El granito tiene la capacidad de admitir excavaciones en vertical o subvertical. La estabilidad depende de los sistemas de fracturas existentes y de los bloques en que se fragmenta el macizo.

#### *Excavaciones subterráneas*

Las excavaciones subterráneas suelen mantenerse bien y cortarse con perfección, aunque con un gasto apreciable de explosivos. Sin embargo, no siempre es una roca fiable por lo irregulares y malamente previsibles que son las zonas caolinizadas del macizo, que dan lugar a despegues y hundimientos.

#### *Otras utilizaciones*

El jabre y la arenas graníticas, especialmente cuando son ricas en arcillas, pueden utilizarse para correcciones de permeabilidad.

#### 7.5.4. Utilización y comportamiento de la aplita

Su composición mineralógica oscila entre la del gabro y el granito, y son sus minerales esenciales el cuarzo, feldespato alcalino y moscovita.

Su alteración es similar a la del granito incluso en mayor grado, dando lugar también a jabres, aunque su escasa extensión hace que su repercusión sea mucho menor que la de los granitos.

Su comportamiento en ingeniería civil es totalmente igual al granito.

#### 7.5.5. Utilización y comportamiento de la pegmatita

Sus minerales esenciales son el cuarzo, feldespato y mica, presentando la moscovita en láminas grandes, concentrada en ciertos enclaves como accesorio. Su textura la hace muy vulnerable a la



meteorización, que suele ser más notable que en la aplita y el granito. Inadecuada para la talla de sillares, bordillos, losas, etc, y para árido de hormigones, balasto, macadam y escolleras portuarias. Por lo general es una roca de escasa utilización y comportamiento negativo, salvo en cimentaciones.

#### 7.5.6. Utilización y comportamiento de la sienita, diorita y gabro

Se diferencian del granito al faltarles cuarzo o tener muy poco y por la mayor abundancia de minerales ferromagnesianos.

Estas tres rocas tienen unas características muy similares a los granitos, aunque por lo general su dureza y resistencia a la abrasión suele ser menor y su facilidad de alteración algo mayor.

Dan buenos resultados como árido para hormigones, balasto y macadam, escollera, cimentación, etc. En general tiene las mismas ventajas e inconvenientes que los granitos, con la salvedad hecha en el párrafo anterior.

#### 7.5.7. Utilización y comportamiento de la diabasa o dolerita

Es una roca de muy buena calidad, de alta densidad que la hace idónea para escolleras de puertos y excesivamente pesada para estructuras en voladizo. Se emplean en adoquines, bordillos, árido para hormigón, balasto y escolleras. Es buenísima roca para cimentación, dada su gran resistencia, impermeabilidad y buen sostenimiento en excavaciones. En carreteras se utiliza como capa de rodadura.

El principal problema que presentan es lo reducido e irregular de sus afloramientos, que hace poco rentable o muy difícil su explotación.

#### 7.5.8. Utilización y comportamiento del pórfido

A pesar de que su labra es costosa, desde muy antiguo los pórfidos han venido empleándose para decoración de columnas, frontones, adoquines. Han sido muy utilizados en firmes de carretera y en áridos para hormigones.

Suelen ser más resistentes a la erosión química y mecánica que sus rocas encajantes (granito, gneis, pizarras). Buenos portadores de cargas. Hacen de pantalla y detienen el agua.

Su primordial inconveniente, como ocurre con todas las rocas filonianas, es su forma de ocurrencia, que obliga a abrir las canteras adaptándolas a la forma del dique.

### 7.6. UTILIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS

La utilización de las rocas volcánicas queda restringida a zonas muy concretas en nuestro país. Así su empleo es total en las Islas Canarias, constituidas por rocas volcánicas y muy restringido en la península.

#### 7.6.1. Utilización y comportamiento de las cenizas y tobas blandas

Se trata de materiales poco densos, muy alterables, que adquieren plasticidad en presencia de agua. Su alteración da lugar arcillas expansivas.

En cimentaciones pueden producirse asentamientos si la capa sobre la que se apoya no absorbe las cargas aplicadas y las transmite a los niveles de cenizas infrayacentes. Las tobas se utilizan como bloques para pequeñas edificaciones y en la fabricación de cementos puzolánicos.



#### 7.6.2. Utilización del lapillo y escorias

Son alterables formando arcillas. Es buen material para terraplenes, pero debe colocarse en tongadas no superiores a 30 cm. Su compactación debe ser mayor que la que se aplica en otros materiales granulares para provocar la ruptura de las puntas que presentan los fragmentos, consiguiendo así el asiento definitivo antes de su utilización.

#### 7.6.3. Utilización y comportamiento de la riolita

Composición mineralógica similar a la del granito. Roca dura y resistente, es usada por estas características en construcción. Da un árido anguloso, pero presenta baja adherencia con el cemento. Es roca impermeable y su alteración da lugar a arcillas. La obsidiana y la pumita son tipos de riolita.

#### 7.6.4. Utilización y comportamiento de la andesita

En buen estado suele utilizarse en mampostería, y machacada, como subbase de carreteras. Es impermeable, así como los productos de su meteorización, por lo cual es buen cierre para obras hidráulicas, no necesitando, los canales abiertos en ella, revestimiento.

#### 7.6.5. Utilización y comportamiento del basalto

Son las rocas volcánicas más extendidas. Sus minerales esenciales son la plagioclasa cálcica y un piroxeno, generalmente augita. Puede tener olivino o no. Color negro fresco y verde oscuro, castaño oscuro o rojizo cuando se altera. Aspecto masivo aunque en ocasiones presenta lajas y disyunción columnar por enfriamiento.

En caso de tener que cimentar sobre estos materiales, hay que investigar con todo detalle su disposición, pues sus resistencias son muy diferentes. Excelente como árido por su superficie rugosa con adherencia magnífica para el cemento y el asfalto. Como adoquinado es resistente, pero algunos tipos de pulen excesivamente y dan lugar a superficies resbaladizas. Dada su dureza, densidad y facilidad de troceado, resulta buena roca para puertos.

Por su resistencia al desgaste, adherencia y escasa absorción, es un material de buen uso en carreteras, tanto como material de base, subbase o rodadura como escolleras y rellenos.

En ferrocarriles es utilizada para balasto si está sana.

Aunque roca impermeable, su excesiva fracturación la hace desaconsejable como cierres a obras hidráulicas. Su alteración, a favor de fractura, da lugar a zonas arcilloarenosas de color rojizo. El conjunto es atacable con máquina sin necesidad de explosivo cuando el macizo está muy meteorizado.



## 8. ROCAS SEDIMENTARIAS

Son las rocas que proceden de otras rocas preexistentes (plutónicas, filonianas, volcánicas, metamórficas o sedimentarias) sometidas a procesos complejos de alteración y/o disgregación.

El proceso se divide en erosión, transporte y sedimentación. Las rocas sedimentarias suponen un 75% de los afloramientos y constituyen el 5% de la corteza terrestre.

La **sedimentología** es la ciencia que estudia los sedimentos y los procedimientos sedimentarios, junto con los fenómenos geológicos que influyen en la sedimentación.

Llamamos **sedimento** al material que se deposita cuando cesa el medio de transporte. La sedimentación es un proceso constructivo que cierra el proceso de los factores geodinámicos externos. Los sedimentos se acumulan en zonas deprimidas de la corteza terrestre: océanos, mares, lagos o ríos y están formados por los componentes:

- **Detríticos.** Gravas, arenas, limos y arcillas.
- **Químicos.** Sílice,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{SiO}_4$ .
- **Biológicos.** Fósiles o restos orgánicos.

Los factores de la sedimentación son:

- **Procedencia.** Situación y procedencia de la roca madre.
- **Modalidad de transporte.**
  - Agua. Clasificación, redondeados.
  - Hielo. No clasificación, angulosos.
  - Viento. Partículas finas, uniformes
- **Duración.** Desgaste, redondez, clasificación.
- **Ambientes.** Temperatura, pH, salinidad, seres vivos.

### 8.1. DEPÓSITO DE LOS MATERIALES SEDIMENTARIOS

Las características del sedimento también dependen de la forma en que se realiza la sedimentación. Las condiciones físico-químicas del medio en el que ocurre la sedimentación tienen gran importancia en el depósito de sedimentos de carácter químico, pues son dichas condiciones las que determinan la existencia de ciertos organismos de cuyos restos se forman sedimentos orgánicos.

Se pueden distinguir dos tipos de medios sedimentarios:

- **Continetales.**
- **Marinos.**



#### 7.1.1. Ambientes sedimentarios continentales

- **Glaciar.** Los depósitos dejados por un glaciar son principalmente la morrena frontal y la morrena de fondo; los materiales detríticos proceden de la meteorización mecánicas de las rocas y no han sufrido rodamiento durante el transporte, siendo depositados todos al mismo tiempo. Resultan sedimentos sin estratificación, con clastos angulosos y sin ninguna selección.
- **Desértico.** Los clastos proceden de la meteorización mecánica de las rocas, pero han sido bien seleccionados durante el transporte eólico; las arenas están mejor o peor redondeadas y presentan estratificaciones cruzadas debido a los cambios de dirección del viento.
- **Fluvial.** Los ríos transportan cantos y granos que solo han sufrido meteorización mecánica y sufren un transporte mecánico, pero también arrastran partículas de arcilla y sustancias en disolución.
- **Lacustre y pantanoso.** Presentan sedimentos detríticos intercalados con otros de carácter químico; en los pantanos puede haber una acumulación de restos vegetales que originen turberas.
- **Albufera.** Se forman detrás de las barras de arena construidas por el oleaje, cuando queda una porción del mar aislada; no obstante, la marea penetra en ellas por canales abiertos en la barra de arena, y vuelve a salir por ellos. Estas corrientes aportan arenas y limos que se depositan en el fondo de la albufera.
- **Deltaico.** Es un ambiente mixto, con caracteres de los ambientes fluvial, lacustre y pantanoso. En él actúan corrientes de agua, viento y el oleaje. Los sedimentos incluyen clastos gruesos y finos, precipitados químicos y materia orgánica

#### 7.1.2. Ambientes sedimentarios marinos

Son más extensos y continuos que los continentales, dependiendo sus características de la distancia a la costa y de la profundidad; se encuentran tanto sedimentos detríticos como químicos y orgánicos.

- **Nerítico.** Situado sobre la plataforma continental, hasta unos 200 metros de profundidad; se acumulan sedimentos detríticos y es frecuente encontrar fósiles marinos.
- **Batial.** Sobre el talud continental entre 200 y 2.000 metros de profundidad, en donde actúan corrientes de turbidez y corrientes de fondo. Se sedimentan limos, arcillas y conchas de organismos planctónicos como los foraminíferos.
- **Abisal.** Situado en los fondos alejados de la costa, en donde se acumulan barros orgánicos de composición silícea.

En la zona nerítica no existe apenas precipitación química y tiene gran influencia el sol.

Los ambientes sedimentarios marinos se producen en arenas saladas.

#### 8.2. LITIFICACIÓN DE SEDIMENTOS

Los sedimentos blandos y esponjosos se endurecen por:

- **Compactación.** Consiste en la reducción de la porosidad y expulsión de los fluidos intersticiales, como resultado de la reorganización de los granos por efecto de la presión de carga de sedimentos superiores. La porosidad es mayor en los sedimentos de grano fino que en los de grado grueso, por lo que su compactación es mayor.



- **Cementación.** Es la precipitación de algún material, por aguas que llevan sustancias disueltas, entre los intersticios de un sedimento, quedando así unidos los granos del sedimento.
- **Diagénesis.** Es el conjunto de reacciones que tienen lugar dentro del sedimento (alotígeno), entre sus minerales o con los fluidos circulantes, resultando la formación de minerales nuevos (antígenos o diagenéticos).
- **Metasomatismo.** Es el reemplazamiento de un mineral por otro de composición diferente, sin que haya variación de volumen. Los átomos de Ca pueden reemplazarse por átomos de Mg como ocurre en la calcita transformándose en dolomita.

### 8.3. ROCAS SEDIMENTARIAS DETRÍTICAS

#### 8.3.1. Gravas y arenas

Son rocas que han sido transportadas en suspensión por las agua, el viento y el hielo sobre los fondos de los ríos, el mar, lagos, y en algunos casos han sufrido escaso transporte y son debidas a la acción del hielo o al golpear las rocas y las olas sobre los cantiles rocosos.

Las arenas y gravas están constituidas, en un porcentaje muy elevado, especialmente arenas, por cuarzo, elemento más resistente e inalterable a los procesos que ha sufrido el sedimento y por tanto el más capaz de alcanzar ese grado de división.

Se extienden por amplias zonas de terrenos sedimentarios, especialmente terciarios y cuaternarios. Los fondos de los valles actuales están cubiertos por estas formaciones; aparecen en mares y lagos, en los depósitos glaciares y periglaciares. También existen depósitos actuales en los ríos y terrazas aunque en estos últimos el material puede estar cubierto por una capa de tierra vegetal y presentar algo de cementación.

Las gravas y arenas son materiales típicos para la fabricación de morteros y hormigones, siempre y cuando no sean lajosas, estén limpias no presentando elementos contaminantes como arcillas, tengan buena resistencia y aceptable adherencia con el cemento o ligante.

También es habitual el empleo de arenas y gravas para macadam, recebos y balastos, siempre que tengan las condiciones exigidas para tales utilizaciones. Arenas limpias suelen emplearse para filtros y drenes. Los filtros tienen por objeto reducir la velocidad de flujo y evitar la migración de finos, que pueden llegar a colmatar los drenes y los revestimientos de los pozos.

La capacidad portante de las gravas y arenas, en muchas ocasiones estratificados con limos y arcillas, es escasa y los asentamientos que se producen pueden ser de tal magnitud que provoque la destrucción de la estructura. Hay que recurrir a cimentaciones especiales como placas de reparto, que transmiten cargas mínimas.

Otros métodos consisten en mejorar las características geotécnicas del terreno mediante acciones como la consolidación o compactación dinámica, por vibroflotación, inyección sólida inyecciones de cemento o químicas.

Los túneles y obras subterráneas son de excavación difícil en terrenos constituidos por gravas y arenas, dados los inconvenientes que presentan: falta de sostenimiento, venidas de agua, heterogeneidad en la perforación, etc. A su falta de cohesión, que produce constantes derrumbamientos, hay que unir su gran permeabilidad, que impedirá el avance en zonas situadas bajo nivel freático. La mejor recomendación que puede hacerse es huir de realizar obras en ellas, pero desgraciadamente esto no siempre es posible. En zonas urbanas, además se suele tener en cuenta la influencia sobre el propio túnel y la que puede producirse sobre los edificios próximos a la zona donde discurre la excavación.



Arenas muy puras, constituidas en su totalidad o en alto porcentaje por cuarzo, suelen presentarse como elemento abrasivo.

### 8.3.2. Limos

Son rocas detríticas cuyo tamaño de grano oscila entre 1/16 y 1/256 mm. Están compuestas por cuarzo, feldespatos alcalinos, algo de arcilla y materia orgánica. Atendiendo a ésta última se suelen dividir en orgánicos e inorgánicos.

Los limos inorgánicos suelen tener nula o escasa plasticidad, siendo muy susceptibles a la licuefacción, se compactan con dificultad y suelen tener una deformabilidad moderada, siendo sensibles a la acción de vibraciones.

Suelen encontrarse en las mismas formaciones que las arenas: depósitos eólicos, fluviales, glaciares, lacustres y marinos. Es habitual que estén mezcladas con arenas y arcillas, aunque como más adelante se verá son materiales muy diferentes. Por supuesto, **no son aptos para morteros**.

En cimentaciones suelen requerir, al igual que las arenas, procedimientos especiales: losas de reparto, pilotajes, etc. Se inyectan con dificultad y para ello son necesarios, por lo general, productos químicos. Su comportamiento es peor cuando se encuentran bajo nivel freático, por lo cual es recomendable, cuando haya que trabajar en ellos, rebajar previamente aquél.

En excavaciones superficiales requieren taludes muy tendidos o sostenimientos con muros y pantallas.

En excavaciones subterráneas se comportan mal, pues necesitan fuertes sostenimientos y las dificultades de avance son grandes, acrecentadas cuando se trabaja bajo nivel freático.

### 8.3.3. Arcillas

Son rocas sedimentarias con tamaño inferior a 1/256 mm. Sus principales constituyentes son minerales arcillosos (silicatos aluminicos hidratados), que presentan formas hojosas. Los principales pertenecen a tres grupos:

- **Caolinita**, originada por la alteración de feldespatos, micas y piroxenos, bastante estables en presencia de agua.
- **Illita**, originada por la alteración de materiales con cantidad adecuada de potasio y cuya actividad al agua es intermedia entre la caolinita y la montmorillonita.
- **Montmorillonita**, originada por la descomposición de olivino; mezclada con agua aumenta de volumen y es el mineral componente principal de las arcillas expansivas.

Otra clasificación que habitualmente se hace de las arcillas es la siguiente:

- **Arcillas impuras.**
  - Margas. Arcilla +  $\text{CO}_3\text{Ca}$
  - Diatomeas. Algas diatomeas (silíceo).
  - Loes. Depósitos eólicos.
- **Arcillas residuales**
  - Terra rossa – óxido de Fe.
  - Terra fusca – óxido de Fe y materia orgánica.



- Lateritas y bauxitas – CFe + Al.

- **Rocas mixtas.** Caliza + arcilla + arena.

Quizás la característica más importante más notable de la arcilla sea la plasticidad, la capacidad de cambiar de forma sometida a un esfuerzo, manteniendo la nueva forma adquirida al cesar éste. Esta plasticidad se pone de relieve cuando la arcilla se mezcla con agua, pues mientras está seca tiene un aspecto terroso, tacto áspero y numerosas grietas, pasando a untuosa y plástica al mojarse.

Es roca impermeable cuando se satura, tiene alta capilaridad, no es susceptible a la licuefacción, su compactación presenta algunas dificultades, es fácilmente erosionable, suele presentar una cierta cohesión y tener un bajísimo o nulo ángulo de rozamiento. Muestra colores muy variados.

Aparece igual que las gravas, arenas y limos, en los sedimentos fluviales, lacustres, glaciares y marinos, siendo producto resultante de la alteración de las rocas ácidas y máficas, así como de las calizas. Ocupa grandes extensiones de terreno y es la roca sedimentaria más común.

Su impermeabilidad impide la existencia de fuentes, aunque los pozos artesianos están ligados a terrenos arcillosos que actúan como material confinante del acuífero.

La utilización de la arcilla sometida a una selección, elaboración y cocción es técnica común en edificación. El uso de ladrillos para muros y tejas para recubrimiento son métodos constructivos que se utilizan desde hace muchísimo tiempo.

Las arcillas sometidas a cocción con altas temperaturas dan lugar a un material alveolar con forma redondeada, de superficie poco porosa y núcleo con gran número de huecos, que sirve como árido ligero tanto para carreteras, subbases, como para edificación y fabricación de hormigones ligeros utilizados como aislantes térmicos.

Las arcillas tienen escasa capacidad portante, por lo que deben tomarse precauciones al cimentar sobre ellas. Los previsible asientos pueden ser importantes y muy dilatados en el tiempo, incluso cuando la estructura esté ya terminada y en uso. Por lo general hay que recurrir a cimentaciones especiales como pilotes.

Las arcillas se utilizan, por su carácter impermeable, como núcleo de presas de materiales sueltos.

En excavaciones subterráneas el comportamiento de las arcillas dependerá de la cementación que pueden presentar, es decir, el porcentaje de carbonato cálcico que tengan, de la compactación natural al que hayan estado sometidas y de la presencia de agua. Cuando están secas se excavan bien, y también se sostienen sin grandes problemas. Sin embargo, saturadas pueden llegar a comportarse como fluidos densos que presionan el hueco hecho por todos sus lados. La sección de túnel más conveniente para este tipo de terrenos es la circular.

En excavaciones superficiales puede decirse lo mismo que de las subterráneas: que sus características y la presencia de agua determinan su comportamiento.

La tendencia a deslizar, especialmente en presencia de agua, como ya se ha dicho, hace recomendable evitar situar en las medias laderas arcillosas en carreteras, ferrocarriles y sobre todo en canales pues si hubiera filtraciones saturarían las arcillas que ejercerían una presión en las tuberías para la cual no han sido diseñadas.

La arcilla unida a la caliza, sometidas a determinados procesos de elaboración y cocción se emplea para la fabricación del cemento.

Las **arcillas** conocidas como **expansivas**, que tienen la montmorillonita como mineral esencial, poseen características que influyen negativamente sobre las estructuras ubicadas en ellas. Los aumentos y disminuciones de volumen que sufren en los procesos de humectación y secado dan



lugar a presiones o asientos capaces de dañar seriamente la estructura. Las características de las arcillas expansivas obliga a tomar determinadas precauciones a la hora de cimentar sobre ellas.

En obras viales, la presencia de arcillas expansivas afecta a los taludes y terraplenes, así como la capacidad portante. Una norma general es la de contar con una buena red de drenaje.

En túneles las presiones sobre los revestimientos, ya señaladas en las arcillas no expansivas, se ven aumentadas en este caso, primordialmente cuando se trata de obras hidráulicas.

#### 8.3.4. Conglomerados

Son las rocas formadas por fragmentos rocosos, clastos, superiores a 2 mm, unidos por un aglomerante que puede ser de carácter detrítico o de naturaleza química.

Los conglomerantes suelen ser impermeables, salvo quizás los calcáreos, y las filtraciones se producen a favor de las fracturas, que suelen inyectarse bien.

En edificación suele utilizarse para chapados y suelos. Por su heterogeneidad no son recomendables para utilizar como árido para hormigón, pues el producto resultante puede estar constituido por material resistente unido a otro de muy mala calidad.

Tampoco suele utilizarse por la heterogeneidad para balasto y macadam.

Como cimiento es una roca aceptable, incluso de gran calidad cuando clastos y cemento dan lugar a una roca resistente.

Impermeables y buena corrección de fugas.

Su comportamiento en excavaciones a cielo abierto viene determinado por su naturaleza. Si son homogéneas admiten cortes verticales, en cambio si son heterogéneas pueden ser molestos.

En excavaciones subterráneas puede decirse lo mismo que para las superficiales.

#### 8.3.5. Areniscas

Son rocas constituidas por clastos de tamaño comprendido entre 2 y 1/16 mm aglomerados por un cemento de naturaleza variable.

Al igual que hemos dicho al hablar de los conglomerados, es totalmente imposible hablar de la utilización y comportamiento de la arenisca, ya que bajo esta definición se acogen rocas muy distintas que van desde la cuarcita, muy dura y resistente, a la arcosa, en ocasiones deleznable con la mano.

Dada su diversidad, estudiaremos las comúnmente utilizadas en ingeniería civil.

##### 8.3.5.1. Cuarcita (ortocuarcita)

Roca formada casi exclusivamente por cuarzo, distinguiéndose de las metamórficas por la ausencia de esquistosidad. Los granos de cuarzo bien redondeados y esféricos están unidos por un cemento silíceo.

No es roca empleada en edificación, ya que su dureza hace muy costoso su trabajo y corte para obtener sillares o bloques.

Dada su gran resistencia a la erosión y alteración, suele ser un abundante componente de las gravas naturales, que se utilizan para hormigones, pues tienen gran resistencia, buena adherencia y poca absorción. Cuando hay que conseguir el árido por machaqueo, su gran resistencia hace



que el proceso sea costoso, pues el desgaste de la maquinaria es elevado, y a la larga es muy caro, especialmente cuando se deben obtener arenas.

Es una roca indicada para balasto y macadam, pero no para capas de rodadura, ya que tienden a pulirse y dar superficies resbaladizas.

En escolleras de puertos, dada su resistencia e inalterabilidad es una roca idónea pues además es bastante pesada. La dificultad se centra en la extracción costosa de los bloques. Es preferible hacer uso de las acumulaciones naturales que obtener el material por machaqueo.

Excelente roca de cimentación, pues su gran resistencia le hace admitir cualquier tipo de estructura.

En las excavaciones superficiales la cuarcita admite parámetros verticales, y los posibles desprendimientos se producirán a favor de fracturas. Al ser una roca impermeable, las filtraciones estarán ligadas a las discontinuidades y no serán excesivas. Como inconveniente presenta el alto costo de perforación.

En excavaciones subterráneas se mantiene bien y no necesita por lo general sostenimiento. El agua que puede haber no es muy abundante y estará ligada a las discontinuidades. Al igual que lo comentado en el párrafo anterior, su coste de excavación es alto y se acrecienta por la necesidad de eliminar perfectamente el polvo que se produce, de gran agresividad y por tanto muy peligroso.

#### 8.3.5.2. Arcosa

Es una arenisca feldespática, constituida principalmente por cuarzo y feldespato potásico. Su origen parece ser la descomposición o alteración de rocas como el granito, gneis y esquistos.

Roca con buenas características mecánicas, admitiendo taludes verticales, pero cambia radicalmente al mojarse, convirtiéndose en un material pastoso que presenta grandes problemas en ingeniería civil.

No es factible utilizarla como árido para hormigones, en carreteras, como balasto para ferrocarril y menos aún como escollera.

Como cimiento, debido a los cambios que experimenta al mojarse, no es aconsejable, pues es difícil asegurar que éstos no lleguen a tener agua en algún momento.

Por supuesto cualquier tipo de obra está proscrita en ella y en los vasos de presa puede lugar a deslizamientos.

En excavaciones superficiales estando seca tiene buen comportamiento, pues admite taludes verticales o cercanos a 90 grados, incluso de altura importante.

En obras subterráneas se cortan bien. Sin embargo, al mojarse produce grandes empujes que obligan a fuertes sostenimientos.

#### 8.3.5.3. Molasa (subgrauvaca)

Arenisca originada originada por los sedimentos producidos por la erosión de una cadena montañosa al final de su fase orogénica. Presenta granos de cuarzo, feldespato, mica, restos fosilíferos y cemento calizo – margoso.

Es una roca procedente de sedimentos poco evolucionados, originados principalmente por acciones mecánicas, con un transporte rápido.

En túneles no precisa revestimientos y se excava con facilidad.



En excavaciones superficiales admite taludes verticales de gran altura, pero se pueden producir desprendimientos a favor de fracturas.

#### 8.3.5.4. Grauvaca

Arenisca con matriz detrítica superior al 15% que contiene fragmentos de rocas mal dosificadas, granos de cuarzo y feldespatos y cemento generalmente arcilloso. Es una roca parcialmente metamorfozada.

Se corta bien en sillares pero es blanda a la abrasión. No es recomendable para hormigones por su estructura pizarraña. Da buenos apoyos. Se arranca bien. Su permeabilidad es a favor de fracturas.

#### 8.3.6. Limonita

Roca resultante de la compactación y cementación de los limos. Lo dicho para los limos es aplicable para la limonita. La compactación y cementación de los limos mejora las características de los limos, lo cual debe tenerse en cuenta.

#### 8.3.7. Arcillita

Se trata de una roca compuesta por arcillas compactadas y cementadas. Puede aplicarse aquí lo dicho para la limonita. La mejora de las características de la roca por la cementación da lugar a un comportamiento mejor que el de las arcillas sueltas.

### 8.4. ROCAS SEDIMENTARIAS INTERMEDIAS

Son las formadas por lutitas, arenas y calizas en proporciones diferentes que sirven para denominarlas.

#### 8.4.1. Marga

Roca constituida primordialmente por lutitas, caliza o dolomía y una escasa proporción de arena. Suele ser normal denominar marga calcárea a la que es más rica en caliza y marga arcillosa a la que presenta gráficamente mayor abundancia de esta última roca. Suele distinguirse de las arcillas puras, además de por una menor plasticidad, por dar algo de efervescencia en función del contenido de caliza que tenga.

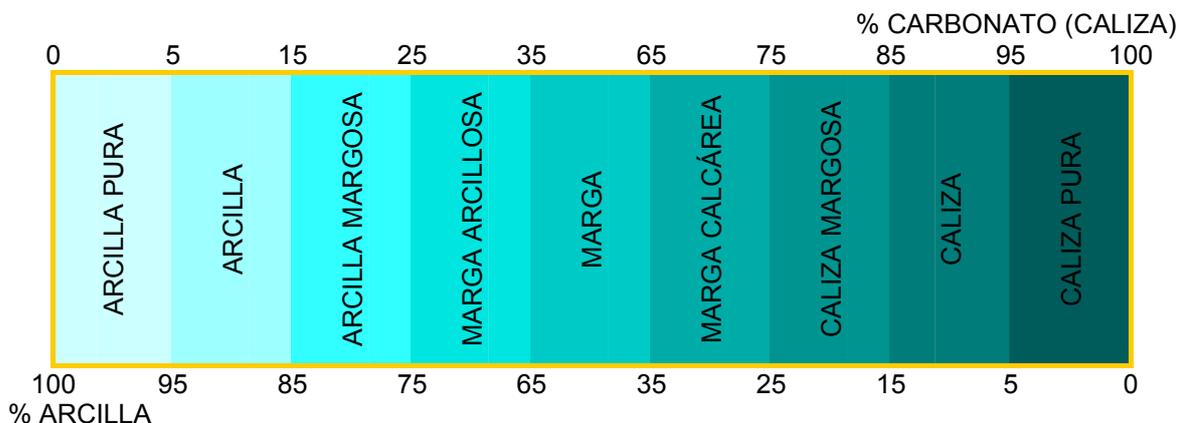
Gran parte de ellas presentan una característica especial conocida como “venteo”, disgregación en escamas debido a su desecación cuando es sometida a la acción del aire. En algunos casos este tiempo es cortísimo, por cual conviene tapanlas cuando se han descubierto ya sea con gunita si se trata de cortes verticales o inclinados, o con arena en caso de aperturas horizontales. Este fenómeno tiene gran importancia tanto en excavaciones superficiales como subterráneas.

Su utilización y comportamiento son muy similares a los de las arcillas y al igual que ellas su escasa resistencia y su fácil erosionabilidad las hacen inadecuadas para áridos, para hormigón, balasto y macadam. Igualmente no pueden emplearse en escolleras de puerto, pues serían fácilmente destruibles por la acción de las aguas.

Las excavaciones subterráneas y superficiales se cortan bien y se mantienen sin necesidad de grandes sostenimientos, especialmente cuanto más calcáreas son. Habrá que tener cuidado de cubrir la excavación para evitar el venteo.

Al igual que se ha dicho en el caso de las arcillas, también hay tendencia a producirse deslizamiento a favor de niveles margosos.

La marga es una roca impermeable, por lo cual los embalses y cerradas resultan estancos.



## 8.5. ROCAS SEDIMENTARIAS NO DETRÍTICAS

### 8.5.1. Rocas carbonatadas

Con este nombre se agrupan una serie de rocas sedimentarias constituidas por carbonatos de calcio, calcio – magnesio, etc. en más del 50%. Además de los carbonatos, en su constitución figuran cuarzo, feldespato, arcilla, restos orgánicos, materia bituminosa, etc.

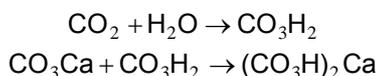
Los minerales esenciales de las rocas carbonatadas son los carbonatos: calcita  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , dolomita  $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ , mientras el aragonito  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , la siderita  $\text{CO}_3\text{Fe}$  y magnesita  $\text{CO}_3\text{Mg}$  son secundarios.

Las dos rocas carbonáticas más comunes son la caliza y la dolomía, cuyos minerales principales son la calcita  $\text{CO}_3\text{Ca}$  y la dolomita  $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ , pudiendo presentar variaciones entre ellas.

#### 8.5.1.1. Caliza

Su mineral esencial es la calcita  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Da efervescencias con el CIH, lo que sirve para distinguirla de la dolomía muy pura. Pueden ser de origen detrítico, orgánico y formadas por precipitación.

Quizás el rasgo más característico de la caliza sea su disolución a largo plazo por las aguas. La capacidad de acción disolvente del agua depende en gran medida del contenido de  $\text{CO}_2$ , que suele tomar de la atmósfera. El proceso se ajusta a las reacciones siguientes:



El bicarbonato cálcico resultante se disuelve rápidamente en el agua. Como residuo de la disolución queda una arcilla de color rojizo, que se conoce como “terra rosa”.

Al ser una roca impermeable, el agua circula a través de las fracturas, de forma que la disolución y las formas resultantes están ligadas a la red de roturas, dando lugar a estructuras muy variadas y cuyo conjunto se conoce con el nombre de karst. Esta morfología kárstica tiene gran influencia en ingeniería civil, como veremos más adelante.

En las calizas, rocas por lo general de dureza media o alta dependiendo de la estratificación, horizontal o inclinada.

El macizo calizo, debido a los huecos creados por la disolución, suele ser receptor de aguas y un magnífico regulador de ellas, éstas son ricas en sales.



La caliza es una roca muy empleada en mampostería y sillería, ya que se corta y trabaja fácilmente, siendo resistente a los agentes atmosféricos, con excepción de los ambientes cargados de algún tipo de ácido, como ocurre en zonas urbanas e industriales.

Dada su buena resistencia, superficie rugosa y adherencia para el cemento y los ligantes asfálticos, se emplea mucho en hormigones.

El empleo de la caliza como balasto fue norma corriente en España durante mucho tiempo; sin embargo, el empleo de la traviesa de hormigón da lugar a una pulverización de la caliza que en presencia de humedad o agua produce una cementación del balasto, con lo que desaparece la flexibilidad del material.

Puede utilizarse para macadam y firmes de carretera. Como las canteras de calizas suelen ser de dimensión notable, es fácil obtener grandes bloques para diques de puertos. Su apreciable densidad y resistencia, así como su inalterabilidad ante el agua a corto plazo, hace que sea una roca buena para tal uso. En otro tipo de escolleras, dado que su machaqueo no es excesivamente costoso, tiene un buen rozamiento y resistencia, es una roca muy utilizada.

Como cimentación, tiene capacidad portante para resistir cualquier tipo de estructura, pero debe cuidarse, en zonas kársticas, no apoyar en puntos en que existan cuevas o huecos próximos a la superficie que pudieran producir hundimientos.

Idóneas para ubicar cualquier tipo de presa, por lo cual en todo el mundo existen muchos emplazamientos en tales rocas.

El sostenimiento en excavaciones superficiales por lo general no tiene problemas, ya que puede presentar frentes verticales, salvo que las familias de fracturas ligadas a los planos de estrato señalen cuñas inestables, que deben ser cosidas mediante anclajes.

En cantiles naturales la existencia de fracturas de descompresión puede dar lugar a formación de cuñas que tienden a volcar, más si en la base existe una roca blanda de fácil erosión. Si estos cantiles bordean carreteras, ferrocarriles, o zonas de asentamientos urbanos o industriales, la caída de las cuñas mencionadas puede tener consecuencias catastróficas o al menos perjudiciales. Para evitar situaciones de esa índole hay que tomar una serie de medidas correctoras que aseguran la estabilidad del cantil o evitan las caídas de fragmentos.

Se comenzará saneando el cantil eliminando las plantas y árboles inestables, que además con sus raíces mueven rocas. Igualmente se quitarán los fragmentos de rocas sueltos que estén a punto de caer. Hechas estas labores, si se quiere evitar la caída de fragmentos de roca sea un problema, se puede cubrir el cantil con malla electrosoldada, sujeta en la parte superior y dejada caer libre sobre el cantil o con pequeñas uniones a la roca, de forma que los fragmentos caigan entre el cantil y la malla, quedando acumulados en la parte baja. En lugar de este procedimiento se puede cubrir el cantil con hormigón proyectado, habiendo colocado previamente una malla sujeta a la roca, con lo que el conjunto adquiere mayor resistencia. A continuación se exponen algunos de los tipos de protecciones para taludes.

- Mallas elásticas.
- Redes de cables.
- Mallas reforzadas con cables.
- Gaviones de cubrición.
- Morteros y hormigones proyectados.
- Anclajes



- Pantallas estáticas.
- Pantallas dinámicas de deformación.

En excavaciones subterráneas también las calizas se mantienen por lo general bien, por lo que en calizas compactas y poco alteradas puede evitar el revestimiento salvo que sea por la función de la obra.

Durante la construcción, los posibles desprendimientos se suelen producir en función de la red de fracturas. Su excavación no es excesivamente dificultosa y se obtiene bien la sección teórica. El problema lo representan las formaciones kásticas que pueden aparecer en la excavación. Ello implica la existencia de rocas alteradas, materiales residuales arcillosos, de características muy distintas a la caliza, presiones intersticiales, venidas de agua, que influye el material de relleno, caudales momentáneos que pueden impedir la continuidad de los trabajos, lo que obliga a realizar drenes permanentes.

Las **cavidades kásticas** con desarrollos complicados e irregulares son muy difíciles de detectar incluso con una investigación detallada y cuidadosa. Por ello no cabe sorprenderse de la presencia de huecos de mayor o menor dimensión en un macizo calcáreo una vez comenzada la obra.

La apertura de canteras en un macizo de calizas puede ser problemática, pues la presencia de zonas kásticas, que pueden estar rellenas de arcilla u otros materiales, rompen la homogeneidad de la roca y dificultan y encarecen la explotación. Presenta buenos frentes de cantera cuando aparece homogénea y seca.

Las calizas “jóvenes” pueden resultar peligrosas por su escasa resistencia provocada tanto por su falta de consolidación como por la gran porosidad.

También se utiliza como materia prima para la producción de cemento.

#### 8.5.1.2. Dolomía

Roca carbonatada cuyo mineral principal es la dolomía,  $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ . Pueden obtener también calcita y existen todos los grados posibles entre la caliza y la dolomía pura. Las muy puras no dan efervescencia con el  $\text{HCl}$  en frío, forma de distinguirlas de las calizas, ya que su aspecto es muy similar.

Aunque hay dolomías formadas por precipitación directa, la mayoría de ellas son producto de la dolomitización de calizas, ya sea durante la deposición del sedimento calcáreo o inmediatamente, ya sea después de la litificación, cuando el sedimento se ha convertido en caliza. Únicamente, la diferencia, a efectos prácticos, que existe con la caliza es la presencia de  $\text{CO}_3\text{Mg}$  en las dolomías. Esto las hace inadecuadas para la fabricación de cemento y como árido para hormigón cuando el porcentaje de carbonato magnésico es alto.

Al igual que la caliza presenta karsticidad, y por ello problemas de filtración similares a aquella.

#### 8.5.2. Rocas evaporitas

Rocas formadas por precipitación química de soluciones saturadas de sales alcalinas y alcalinoterras. Se forman por evaporación de aguas marinas o de lagos.

La roca evaporita de mayor interés desde el punto de vista de la ingeniería civil es el yeso, dado que su presencia en nuestro país es muy amplia.



#### 8.5.2.1. Yeso

El yeso es sulfato cálcico hidratado ( $\text{SO}_4\text{H}_2\text{O}$ ). La textura de los yesos es variable, puede tener aspecto fibroso, cristalizado en punta de flecha, en láminas transparentes llamándose entonces alabastro.

Por lo general se puede rayar con la uña, pero hay algunas variedades muy compactas que solo se pueden rayar con una navaja.

Cuando se presenta masivo puede dar lugar a morfologías kársticas.

Quizás la característica más notable del yeso, desde el punto de la ingeniería civil, sea su rápida solubilidad, que puede hacerse notoria, contrariamente a lo que ocurre en la caliza, durante la vida de una estructura e incluso en mucho menor tiempo.

El desarrollo de karsticidad en yesos es muy rápido, pero menos notorio que en las rocas carbonatadas, salvo casos excepcionales, ya que la menor resistencia del material hace que las estructuras resultantes de las disoluciones se hundan y desaparezcan rápidamente en una gran mayoría de casos.

El yeso y las aguas selenitosas atacan el aluminato tricálcico del cemento, dando lugar a que los hormigones se desintegren. Este problema se soluciona con el empleo de cementos especiales, resistentes a este ataque, como el cemento aluminoso, el cual deja en su hidratación alúmina libre y no cal, como ocurre con el cemento Pórtland. Esta cal reacciona con el sulfato dando lugar a sulfoaluminato cálcico, que aumenta de volumen creando tensiones que pueden llegar a producir grietas en las estructuras de hormigón.

Sobre la base de su agresividad hacia el cemento, su alta solubilidad y escasa resistencia al desgaste, el yeso está totalmente proscrito como árido para hormigones o morteros.

Su rápida solubilidad impide su uso como balasto y su reducida resistencia, para macadam. Ambas características influyen negativamente para su empleo en escollera.

Como cimiento tiene una resistencia aceptable; el problema es la presencia de agua, por lo cual toda la cimentación bajo nivel freático no debe realizarse. Incluso una cimentación en seco, en caso de que la estructura pueda aportar agua al terreno resulta problemática. Conviene que tal tipo de cimentación sea visitable para comprobar las posibles filtraciones, a fin de encauzarlas antes de que lleguen al terreno.

En excavaciones, tanto superficiales, tanto superficiales como subterráneas, cuando el yeso se presenta masivo, se corta bien y tiene buen mantenimiento, que no se ve alterado por la presencia de agua al tratarse de un macizo impermeable.

Por lo general, los túneles de carretera y ferrocarril no suelen necesitar revestimiento.

Lo aquí expuesto pone de relieve que el macizo de carácter yesífero, ya sea homogéneo o mezclado con otros materiales, no es el lugar más idóneo para ubicar una estructura, especialmente si es de envergadura. Desgraciadamente la abundancia de las formaciones yesíferas hace casi imposible evitarlas. Por ello debe tenerse en cuenta su acción agresiva para los cementos, evitar la presencia de agua, especialmente si está en movimiento.



### 8.5.3. ROCAS ORGANÓGENAS

Son los combustibles fósiles: carbones y petróleo.

- **Carbones**

- Antracita. 95 - 100% de carbono, poco volátil y gran poder calorífico.
- Lignito. 55 – 70% de carbono, aspecto leñoso, gran contenido en azufre.
- Hulla. 75% de carbono, volátiles variado.
- Turba. Menos del 55% de carbono. Materia orgánica reciente, zona pantanosa, problemas en obras lineales.

En estas rocas el componente es el carbono y se originan a expensas de materia orgánica vegetal.

- **Petróleo.** Acumulación natural de bicarburos líquidos, gases o sólidos (asfalto) procedentes de la evolución de materia orgánica debida a la acumulación de microorganismos o peces en fondos marinos que sufren una fermentación anaeróbica.

El **sapropel** es un fango rico en materia orgánica producto de la fermentación de la materia orgánica descompuesta.

Los lugares donde se produce la acumulación de restos orgánicos son cuencas submarinas, poco profundas y subsidentes, de los márgenes continentales, en los cuales se forman grandes espesores de sedimentos. La presión hace emigrar el petróleo hacia zonas de menor presión.

Para la formación de un yacimiento de petróleo se requiere, no sólo que éste se forme, sino también que, dada su movilidad, concurren una serie de circunstancias favorables para su almacenamiento; estas circunstancias dependen de las características de las rocas que constituyen el yacimiento y de las estructuras que presentan. Así, en los yacimientos petrolíferos se encuentran tres tipos de rocas denominadas roca madre, roca almacén y roca cobertera, que constituyen la llamada “serie petrolífera”.

La **roca madre** es aquella cuyas condiciones de formación fueron favorables para la génesis de hidrocarburos. Los hidrocarburos generados en estas rocas aparecen en forma de gotas dispersas, que no constituyen un yacimiento, pero que, si no emigran y quedan retenidos en la roca, son susceptibles de explotación por destilación de la roca madre, aunque éste método es muy costoso.

La **roca almacén** es la que, gracias a su porosidad y permeabilidad, puede contener petróleo, aunque no se haya formado en ella.

El petróleo se forma en la roca madre y migra a la roca almacén donde puede ser explotado.

Para que quede formado un yacimiento petrolífero es necesario que la roca almacén esté cubierta por una roca impermeable, de manera que el petróleo no pueda escapar hasta la superficie, y además, que la disposición de las rocas no permita esta migración. A dicha disposición se le conoce con el nombre de **trampas petrolíferas**.



## 9. ROCAS METAMÓRFICAS

Llamamos **metamorfismo** al proceso mediante el cual las rocas sólidas modifican su textura, estructura y composición mineralógica, por cambios de presión y temperatura y da lugar a la formación de rocas nuevas (rocas metamórficas).

La presión es conocida como **presión litostática** o **de confinamiento** y es debida a las rocas suprayacentes, crece con la profundidad. A los 4 km de profundidad llega a las 1000 atm. Aunque los valores dependen de la densidad y espesor de los materiales suprayacentes.

En cuanto a la temperatura, la tierra tiene un gradiente geotérmico, es decir, que aumenta con la profundidad del orden de 30° C por km. También aportan temperaturas altas las intrusiones magmáticas y los rozamientos entre bloques de fallas.

La duración de éstos procesos son millones de años y como consecuencia de ellos se consigue aporte de materiales y pérdida de gases y elementos volátiles.

El proceso seguido con la presión y la temperatura es que la roca se vuelve plástica provocando plegamientos (aumenta la densidad y disminuye el volumen).

Las consecuencias son deformaciones de la red cristalina, cristales hojosos, alargados o aciculares; pueden afectar a cualquier roca, incluso de una vez.

### 9.1. TIPOS DE METAMORFISMO

Normalmente el metamorfismo implica sólo un ligero cambio en la composición química global de la roca, aunque hayan ocurrido cambios mineralógicos. Según los agentes que hayan intervenido durante el metamorfismo pueden distinguirse varios tipos

#### 9.1.1. Metamorfismo dinámico

No se producen cambios químicos ni recristalización apreciable, pero los minerales se disponen paralelamente dentro de la roca, en sentido perpendicular a la dirección en que actúa la presión, dando lugar a la aparición de planos de pizarrosidad o esquitosidad; si estos planos llegan a estar bien desarrollados enmascaran a los planos de estratificación, con los que pueden confundir. En general diremos que este tipo de metamorfismo se debe más a las altas presiones que a las temperaturas.

#### 9.1.2. Metamorfismo térmico o de contacto

El agente principal es el aumento de temperatura, aunque con carácter secundario, actúa también la presión. El principal efecto es la recristalización de la roca resultando una roca de grano fino, debido al rápido enfriamiento. También se les conoce a este tipo de rocas como corneanas.

#### 9.1.3. Metamorfismo regional

A medida que las rocas sufren el aumento de la presión confinante y de la temperatura; como estos factores aumentan con la profundidad, con ella aumenta también el grado de metamorfismo que las rocas sufren.

Se conoce como **pirometamorfismo** al proceso de formación a una temperatura muy alta en contacto con lavas volcánicas.

La fracturación y rotura de rocas sin recristalización recibe el nombre de **cataclástico**.

El metamorfismo **metasomático** supone un cambio en la composición.



El metamorfismo petrógrado se da en rocas que solo son estables a altas temperaturas cuando bajan.

## 9.2. TEXTURA Y ESTRUCTURA

Durante el proceso de metamorfismo se desarrollan nuevos cristales, "cristaloblastos" que dan las siguientes estructuras:

- Granoblásticas. Granos isométricos, cuarcita, mármol.
- Lepidoblásticas. En forma de escamas, exfoliables, micacita.
- Nematoblásticas. En forma de hilos, gusanos, gneis.
- Diablásticas. Cristales interpenetrados con otros, feldespatos.
- Porfidoblásticos. Cristales grandes entre otros más pequeños, gneis granular.
- Porquiloblásticos. Cristales variados.
- Heliáticos. Cristales que presentan giros helicoidales.

Las estructuras más frecuentes son estratificaciones, esquistosidad, pizarrosidad y micropliegues.

## 9.3. MINERALES DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS

Los procesos metamórficas pueden dar lugar a minerales nuevos a un incremento notable de alguno ya existente, en lo que se conoce como cristalización, o bien se puede formar por sustitución de uno ya existente, conociéndose entonces como recristalización.

Los minerales en las rocas metamórficas, al igual que ocurre con las ígneas, no son numerosos. El cuarzo, el feldespato y la biotita son las más abundantes.

## 9.4. UTILIZACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS

### 9.4.1. Mármol

Los mármoles son rocas que proceden de un metamorfismo de contacto de alto grado o de metamorfismo regional de calizas o dolomías. Los minerales principales son calcita y dolomita.

Cuando se trata de dolomías o calizas muy puras el resultado es un mármol blanco.

### 9.4.2. Cuarcitas metamórficas (metacuarcitas)

Son rocas procedentes de areniscas o sedimentos arenosos sometidos a metamorfismos de contacto regional. Están constituidas primordialmente por cuarzo con un cemento de la misma naturaleza que da una gran homogeneidad a la roca.

Desde el punto de aplicación a la ingeniería civil, dada la similitud con las cuarcitas sedimentarias (ortocuarcitas), puede aplicarse lo dicho sobre ellas.

### 9.4.3. Pizarras

Son rocas de metamorfismo regional cuyos minerales esenciales son moscovita, cuarzo, clorita y en algún caso grafito.



Ha estado sometida a fuertes deformaciones por lo que tiene una marcada hojiosidad que hace que tengan gran visibilidad, característica que se aprovecha para alguna de las utilidades que se hacen de ellas.

Su notable esquistosidad hace que sean abundantes los episodios de cabeceos de ladera y deslizamientos, descritos en párrafos anteriores, especialmente cuando se trata de pizarras grafitosas.

La alteración da lugar a residuos arcillosos y suelos rojizos de no gran espesor. Esta alteración, cuando se ha desarrollado en facturas, hace que éstas aparezcan de material arcillosos, incidiendo en el comportamiento del macizo pizarreño.

La acusada esquistosidad de esta roca hace que al machacarla se obtenga un fragmento lajoso que la hace inservible como árido para hormigones. Algo similar ocurre para su utilización en carreteras y ferrocarriles.

En pedraplenes no parece ser muy aconsejable su uso, ya que el fragmento lajoso que se obtiene tiende a romperse y orientarse, dando lugar a asientos importantes durante la construcción y en el periodo de uso.

La fisibilidad de la roca la hace inapropiada para su uso en escolleras de puerto, ya que obtener bloques de gran tamaño y forma con tendencia cúbica es casi imposible.

En la edificación la pizarra ha tenido un uso tradicional, en especial en techados y cubriciones.

La pizarra no es mala roca de cimentación, salvo que esté alterada, lo que unido a su impermeabilidad hace que sea frecuente la ubicación de presas sobre esta clase de terreno.

En excavaciones subterráneas el comportamiento de las pizarras depende más de la densidad de la facturación y de la incidencia de los planos de rotura y de esquistosidad con las estructuras que del grado de metamorfismo de la roca matriz.

Combinando los diversos factores, roca matriz, alteración, fracturación, esquistosidad y estratificación, se puede llegar a muy diversos comportamientos y soluciones de sostenimiento, que pueden extenderse desde el gunitado a anillos de hormigón armado.

En excavaciones superficiales la situación es muy parecida a la que se produce en las subterráneas.

La posibilidad de deslizamiento se acentúa cuando se trata de pizarras grafitosas o con niveles de grafito intercalado.

La pirita presente en las pizarras se oxida. Los productos de esta oxidación reaccionan con el carbonato cálcico, presente en la roca, dando lugar a yeso.

#### 9.4.4. Filitas

Un mayor aumento de metamorfismo hace que las pizarras se transformen en filitas. Prácticamente la utilización y comportamiento de estas rocas es muy similar, por no decir igual, a los de las pizarras.

#### 9.4.5. Esquistos

Son rocas metamórficas de metamorfismo regional que pueden ser de bajo y alto grado. Se suelen denominar en función del mineral predominante. Los minerales más abundantes son el cuarzo, la mica, la clorita y el talco.



Su utilización y comportamiento es similar al de las rocas foliadas que se han tratado antes, aunque su mayor grado de metamorfismo hace que sean más adecuadas que aquellas para ciertos empleos, así en escolleras. La tendencia a los deslizamientos también disminuye.

#### 9.4.6. Gneis

Los gneis son rocas metamórficas regionales de alto grado de metamorfismo cuyo origen son los cambios sufridos por rocas ígneas o areniscas arcóscicas. Los minerales más comunes son el cuarzo, el feldespato y micas.

Los gneis son similares en su aspecto al granito, presentando una alteración similar a éste: caolinización de los feldespatos y oxidación de las micas, con formación de jabre y arenas gruesas.

En la utilización y comportamiento del macizo de gneis influye el que éste sea micáceo o glandular. En el primero, la esquistosidad más marcada hace que el uso sea más restringido.

Para áridos de hormigón, el gneis glandular sano puede emplearse cuando no es fácil de encontrar otro material y siempre que cumpla las especificaciones de la EHE. Puede dar al machacarlo formas alargadas y contenido de mica, cuya eliminación requerirá el lavado de material. El micáceo está totalmente proscrito.

Para balasto, el gneis es una de las rocas recomendadas por la N.R.V. 3-4-0.0., siempre que esté sin alterar.

En excavaciones superficiales hay que tener en cuenta la situación espacial de la foliación con respecto al plano de corte. Hay mayor tendencia al deslizamiento de los gneis micáceos.

En el comportamiento de los gneis en excavaciones subterráneas es aplicable lo dicho para los granitos, sin más que añadir el efecto de la foliación.

#### 9.4.7. Anfibolitas

Son rocas de metamorfismo regional de grado medio a alto que proceden de rocas magmáticas, calizas, tobas, margas o sedimentos o ricos en hierro y calcio, siendo muy difícil determinar su origen concreto.

Sus minerales principales son hornblenda y plagioclasa, siendo escaso el cuarzo.

Tienen una capacidad portante más bien baja aunque suficiente en cualquier caso para el apoyo de obras medias. No sirven como áridos de hormigón, en general, ni para balastos ni firmes de carretera. Pueden ser considerase impermeables.



## 10. INVESTIGACIÓN DEL MACIZO

### 10.1. INTRODUCCIÓN

Es de sumo interés el conocimiento aislado de cada uno de los elementos constituyentes del macizo, matriz rocosa, y discontinuidades; lo es en mayor grado averiguar la respuesta del conjunto ante las sollicitaciones que se le hacen, que no es la suma de las respuestas aisladas de cada componente.

La investigación del macizo no suele ser sencilla e implica unos costes que pueden ser elevados, por lo cual debe plantearse con sumo cuidado a fin de realizar sólo los trabajos y ensayos necesarios, sacándoles el máximo provecho.

### 10.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Toda investigación tiene un objetivo general que es conocer las características del macizo, que en menor o mayor grado pueden afectar o verse afectadas por la realización por una obra.

Además de este objetivo general existen otros objetivos parciales que son:

- Definición de la litología.
- Definición de la estructura.
- Definición de la fracturación.
- Definición de las propiedades ingenieriles de los materiales que constituyen el macizo.
- Definición del nivel freático y sus cambios estacionales o introducidos por la construcción.
- Condicionantes peligrosos tales como laderas inestables, fallas activas o potencialmente activas.
- Respuesta del terreno a los cambios de las condiciones naturales.
- Validez de los materiales para su diverso uso en obra, áridos, núcleos impermeables, filtros, etc.

Los factores de la investigación suelen ser tres: costo, extensión y profundidad. No siempre hay una relación directa coste – tamaño sino más bien coste – complejidad del macizo.

### 10.3. LOS MEDIOS DE LA INVESTIGACIÓN

Cualquier investigación debe comenzar con un análisis del material previo que se ha obtenido, seguido de un reconocimiento “in situ” que proporcione un plano geológico previo, en base al cual debe proyectarse la investigación a efectuar.

#### 10.3.1. Documentación previa

La primera labor a efectuar es la recogida y análisis de la documentación existente sobre el tema o zona de trabajo. Esta documentación, por lo general, será más restringida cuanto más profundicemos en el asunto o cuanto más limitemos la zona de trabajo.

El mapa geológico editado de mayor interés es el Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. El plano geológico se complementa con una memoria descriptiva en la que se analizan los



aspectos geográficos, la estratigrafía, petrografía, tectónica, historia geológica, minería y canteras, hidrogeología y paleontología (no siempre) y se incluyen numerosas fotografías.

#### 10.3.2. Levantamiento geológico

Toda información precedente nos sirve para tener una orientación previa, tanto más profunda cuanto más amplia sea aquélla, que hará que el planeamiento de las observaciones sea detallado y preciso, lo que supondrá un enorme ahorro de tiempo, factor éste nada despreciable, pero que no evitan acudir y tomar datos directamente en el terreno.

Posteriormente, el plano geológico, resultado del levantamiento, deberá incorporar la situación de todas las investigaciones que se hagan: alicatas, sondeos, galerías, geofísica, etc.

### 10.4. INVESTIGACIONES PROFUNDAS

#### 10.4.1. Investigaciones directas

Entendemos por tal las investigaciones efectuadas directamente al terreno “destruyéndolo”, como las zanjas, los pozos, las galerías y los sondeos, en contraposición con las investigaciones indirectas, en las cuales no se altera el terreno. Ambos tipos de investigación con complementarios.

##### 10.4.1.1. Calicatas y zanjas

Es una labor no excesivamente costosa y bastante rápida, siempre y cuando el lugar sea accesible, cosa que puede no suceder. Las calicatas y trincheras son especialmente indicadas en rocas blandas, cuya excavación no requiera la utilización de explosivos.

##### 10.4.1.2. Pozos

Presentan dificultades de ejecución superiores a las zanjas, viniendo su limitación impuesta por el tipo rocoso y la situación del nivel freático.

##### 10.4.1.3. Galerías

La galería es un método de investigación de gran calidad, ya que permite la observación en profundidad y en zonas directamente afectadas por la estructura. Pero su elevado coste la hace prohibitiva en la mayoría de los casos y sólo podrá utilizarse en obras de gran importancia en las que el coste de la excavación de la galería no repercuta grandemente en el presupuesto total.

##### 10.4.1.4. Sondeos

Es la forma más extendida de investigación del terreno, ya que permite alcanzar grandes profundidades, obtener muestras de ese terreno (testigo) y realizar una serie de ensayos que nos definen las características del macizo rocoso. El objetivo primordial de las perforaciones de investigación es, generalmente, la obtención de testigos del terreno que nos permite conocer éste de forma directa y en profundidad.

No debe olvidarse que el sondeo proporciona una información puntual, condicionada tanto por el propio método como por la calidad con que se hace el trabajo; por este motivo la información estará en función de esos dos factores.

En esencia, un equipo de sondeos está compuesto por la sonda, el motor que la mueve, por lo general unido a ella, una bomba, el castillete o torre de sondeo y el material de corte y soporte del mismo. Los métodos esenciales de realizar los sondeos de investigación son dos: percusión y rotación.



### *Sondeos de percusión*

Consiste en la hincada de una columna de tubos, columna de entibación, de pared gruesa, de longitud entre 1 y 3 metros. La hincada del tubo se efectúa mediante una maza de unos 100 kg de peso, guiada por una varilla roscada a la parte superior de los tubos a hincar, provista de un tope en el que golpea la maza.

La penetración se consigue mediante una cabeza cortante, zapata de hincada o trépano, situada en el extremo de las tuberías. A fin de evitar acodamientos conviene girar la tubería, a la vez que se efectúa el avance, cada un número determinado de golpes.

### *Sondeos a rotación*

Es el método más corriente para los sondeos de investigación. Consiste en el avance mediante una rotación de una columna de tuberías en cuyo extremo hay un elemento cortante, corona.

El equipo de perforación a rotación está formado por la sonda, bomba y castillete o torre. La sonda es la máquina que hace girar los elementos de corte; la bomba tiene por objeto inyectar agua en la perforación a fin de refrigerar la corona y eliminar el detrito; el castillete o torre permite la extracción de la tubería, cuando hay que sacar el testigo o cuando hay que añadir tubería para prolongar la perforación.

La **corona** situada al extremo de la columna de tubos, varillaje, puede ser de dos tipos: de vidia y de diamante. Las de vidia están formadas por carburo de wolframio con un 10% de cobalto, están constituidas por un cilindro de acero en el que se engastan.

Las coronas de diamantes está hechas con diamantes industriales, aquellos que no pueden utilizarse en joyería por sus imperfecciones.

Las coronas de vidia suelen utilizarse con rendimientos interesantes en rocas blandas, llegando incluso a emplearse para perforar calizas. Las coronas de diamante se usan para rocas duras y semiduras. Dado el precio de las coronas de diamante, convendrá tener especial cuidado con su empleo.

#### 10.4.2. Investigaciones indirectas

Los métodos indirectos son aquellos que se realizan sin la necesidad de alterar el terreno ni permiten la observación directa de él. Se basan, por lo general, en medir desde la superficie alguna propiedad física de los materiales que constituyen el macizo. Estos métodos son los siguientes:

- **Métodos eléctricos.** Basados en la circulación de una corriente eléctrica en el macizo.
- **Métodos sísmicos.** Basados en la propagación de ondas elásticas en el terreno.
- **Métodos magnéticos.** Basados en el desigual magnetismo que presentan los distintos tipos pétreos.
- **Métodos gravimétricos.** Basados en las anomalías del campo gravitatorio producidas por los distintos materiales del macizo.



## 11. ESTRATIGRAFÍA

Es la ciencia que estudia los estratos desde su origen, procesos evolutivos, transformaciones y correlación de las rocas sedimentarias a lo largo del tiempo.

Interpretación de datos y observaciones para conocimiento del pasado. Sus aplicaciones económicas son la ingeniería, la minería, yacimientos de petróleo y carbón y aguas subterráneas.

### 11.1. CONCEPTOS GENERALES

Llamamos **estrato** al material de origen sedimentario limitado por dos planos que lo individualizan dentro de una serie estratigráfica. El estrato se define por su rumbo, buzamiento, potencia, fósiles y litología.

Las causas de la estratificación son: cambios estacionales, cambios climáticos, variación de la energía de las corrientes de agua, variaciones del nivel del mar y las condiciones de vida de los seres vivos.

Llamamos **facies** a las características lito y biológicas durante su formación que permiten diferenciar unos terrenos de otros.

- **Litofacies.** Basados en caracteres litológicos.
- **Biofacies.** Basadas en caracteres biológicos (fósiles).

Una **unidad estratigráfica** es un volumen de rocas sedimentarias determinando que se puede individualizar de otros por caracteres litológicos, biológicos o cronológicos.

Cuando la sucesión de capas o estratos no tienen interrupciones hablamos de **continuidad**. Mientras que la interrupción de la sucesión durante un lapso de tiempo es una **discontinuidad**.

Una **laguna estratigráfica** es el espacio en el que no hubo depósito y el **vacío erosional** es el espacio correspondiente al material erosionado. Llamamos **hiato sedimentario** al espacio de tiempo en el que no hubo depósito.

Llamamos **transgresión** al avance del agua de mar sobre la zona costera, por hundimiento de la costa o por elevación del nivel del mar. La **regresión** es la retirada del mar por elevación de la costa o bajada del nivel de mar.

En función de la forma de los estratos puede haber **concordancia** cuando hay capas paralelas sin interrupción o **discordancia** si las capas no son paralelas.

La **cronología** data los acontecimientos geológicos a lo largo del tiempo.



## 12. GEOLOGÍA HISTÓRICA

La presencia de fósiles sirven, entre otras cosas, para datar los terrenos de una forma relativa respecto de otros anteriores o posteriores; pero el problema se complica cuando se pretende establecer una cronología absoluta.

De todos los métodos ideados, el más exacto es el que se basa en las reacciones de desintegración de los elementos radiactivos de las que quedan Helio y Plomo como subproductos. El Helio se desprende pero el Plomo permanece en el lugar de origen. La relación existente entre el plomo formado y el material radiactivo sin desintegrar, conociendo el periodo de éste, nos permite averiguar el tiempo transcurrido desde que se formó la roca en cuestión.

Los métodos para determinar la edad absoluta de una roca son numerosos y variados.

### 12.1. ERA ARCAICA

Corresponde a los materiales más antiguos de la corteza terrestre anteriores a los tiempos fosilíferos. Se divide en dos periodos separados por un ciclo orogénico que en América se conoce con el nombre de **Huroniano** y en el Norte de Europa recibe el nombre de **Careliano**. Estos dos periodos son el arcaico y el precámbrico.

#### 12.1.1. Arcaico

No hay orogenias. Los terrenos emergidos corresponden a parte de América del Norte, Groenlandia, Escandinavia y Finlandia.

Las rocas están fuertemente metamorfozadas y abundan: gneis, migmatitas, granitos, esquistos, pizarras, diabasas y pórfidos.

No se encuentran fósiles y por tanto las correlaciones son muy difíciles y se realizan por criterios petrográficos y por la presencia de discordancias. Si hubo algunos restos fósiles fueron destruidos por los efectos del elevado metamorfismo.

Las orogenias Huroniana – Careliana separan el periodo Arcaico del Precámbrico.

#### 12.1.2. Precámbrico

Todo el planeta entra en una fase muy movida. Se producen los plegamientos **Huronianos** y **Carelianos** que dan origen a las primeras cadenas montañosas. Se inicia una intensa actividad volcánica y se produce también una intensa erosión.

Aparecen las zonas emergidas se Liberia, China, Brasil, África, Madagascar, India y Australia.

Predominan las rocas: areniscas, cuarcitas, pudingas satinadas y esquistos arcillosos. Entre las rocas volcánicas aparecen basaltos, diabasas y pórfidos.

Aparecen ya algunos restos fósiles, muy escasos y mal conservados, entre los que destacan: algas calcáreas, arrefices de coral, radiolarios y flagelados.

En España el Precámbrico aflora en Galicia, Montes de Toledo y Extremadura y está formado por rocas metamórficas: gneis, micacitas y migmatitas.

### 12.2. ERA PRIMARIA O PALEOZOICA

En esta era predominan los sedimentos marinos con restos fósiles. Se divide en seis periodos: **Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico**.



Desde el Cámbrico al Silúrico tiene lugar la orogenia **Caledoniana** y del Devónico al **Pérmico** se desarrolla la orogenia **Herciniana**, que afectó profundamente a Europa y muy particularmente a la Península Ibérica.

#### 12.2.1. Cámbrico

- No hay fenómenos orogénicos importantes.
- En el hemisferio Norte existen ya dos continentes: el **Siberiano** y el **Noratlántico**. Dividido en dos núcleos: **Algónico** y **Escandinavo**. En el hemisferio Sur las tierras emergidas tienen contornos imprecisos.
- Predominan las pizarras.
- Existen solo invertebrados marinos: trilobites y braquiópodos. Son importantes los arqueociáticos.

#### 12.2.2. Ordovícico

- Se inicia la formación de la cadena montañosa Caledoniana.
- Salvo esta emersión de tierras, la distribución de tierras y mares es la misma.
- Predominan las pizarras y algunas cuarcitas.
- Entre los grupos fósiles destacan: graptolites, Crinoideos, Nautiluideos y Trilobites.

#### 12.2.3. Silúrico

Es un periodo muy parecido al anterior con abundancia de pizarras y cuarcitas. Los fósiles más abundantes siguen siendo Graptolites y Trilobites.

#### 12.2.4. Devónico

- No hay ningún accidente orogénico especial. En este periodo y en el siguiente se forma el gran geosinclinal que dará lugar a la gran **Cadena Herciniana**.
- La distribución geográfica de tierras y mares no varía.
- Predominan las pizarras y areniscas rojas, llamadas antiguas.
- Abundan los Tetracoralarios y aparecen los primeros Anmonoideos con el Goniatites. Además se encuentran Anfibios y Peces Acorazados. Entre las plantas aparecen las primeras Gimnospermas.

#### 12.2.5. Carbonífero

- Durante la primera mitad continúa el desarrollo de geosinclinales. Al final del Carbonífero y durante el periodo siguiente tienen la máxima intensidad los Plegamientos Hercinianos.
- La tierra queda delimitada en tres continentes: Noratlántico, Chino-Siberiano y el Gondwana, con un gran mar interior llamado Mesogea o Mar de Tehys.
- Predominan las pizarras, areniscas, grauvacas y calizas. Son muy importantes los yacimientos de Carbones minerales, que se forman durante los periodos de facies continental.



- Alcanzan su máximo desarrollo las Pteridofitas y las Gimnospermas. Desarrollo de los Anfibios y decaen los Trilobites.

#### 12.2.6. Pérmico

- El gran plegamiento herciniano afecta al Centro y Norte de Europa y a la Península Ibérica. Igualmente afecta a zonas del Norte de América.
- El aspecto de las tierras emergidas no cambia sensiblemente. Grandes áreas quedan cubiertas por coladas de lava basáltica.
- Predominan rocas detríticas de facies continental: conglomerados y areniscas rojas, arcillas con evaporizas, que a veces no se distinguen de las rocas del periodo siguiente y se conocen como rocas permotriásicas.
- Aparecen los reptiles. Desaparecen los trilobites. Aparecen las coníferas.

Del Cámbrico al Silúrico tiene lugar la orogenia Caledoniana y se originan cordilleras en Escocia, Escandinavia, Las Ardenas, Bohemia y Moldavia, Liberia, Groenlandia y el Norte de América.

Del Devónico al Pérmico tiene lugar la orogenia Herciniana y se originan cadenas montañosas en la península ibérica, los Urales, Altai en Asia y los Montes Apalaches en América del Norte.

#### 12.2.7. Terrenos primarios en España

Se encuentran terrenos primarios en el zócalo herciniano de la Meseta, especialmente en Extremadura, Sierra Morena, Galicia, Asturias, Cordillera Ibérica, Cordilleras Béticas y en la zona axial de los Pirineos.

Abundan las rocas metamórficas: pizarras, cuarcitas, litarenitas o grauvacas, micacitas y gneises. También hay calizas marmóreas especialmente en los periodos Cámbrico, Devónico y Carbonífero.

Se encuentran numerosos yacimientos fosilíferos especialmente en Arqueociátidos, Trilobites, Graptolites y Fusulinas.

La orogenia Herciniana afectó a la Península Ibérica formando una serie de pliegues de dirección NO-SE, que dan una configuración espacial al paisaje peniplanizado en Extremadura y otras zonas del zócalo paleozoico de la Meseta castellana. En el paisaje destacan los crestones de cuarcitas con cotas topográficas más altas entre zonas más bajas constituidas por pizarras.

### 12.3. ERA SECUNDARIA O MESOZOICA

Son muy abundantes los sedimentos marinos: calizas, areniscas, calizas dolomíticas, dolomías y margas. En las facies continentales encontramos: conglomerados, areniscas y arcillas frecuentemente asociadas a formaciones salíferas y evaporizas.

Se divide en tres grandes periodos: Triásico, Jurásico y Cretácico.

#### 12.3.1. Triásico

- No se producen movimientos orogénicos durante el Triásico.
- Sigue la distribución de tierras y mares en las tres unidades separadas por el mar de Tetys: Noratlántico, Chino-Siberiano y Gondwana.



- Abundan las rocas siguientes: areniscas, calizas y dolomías, junto con arcillas de colores variados con yeso, jacintos de Compostela y aragonitos.
- Se conservan aquí algunas formas fósiles del periodo anterior: anfibios y goniátites. Aparecen los primeros amonites, belemnites y continúan su desarrollo los Anfibios y Reptiles.

El triásico comprende terrenos de facies marina y facies continental.

En la Península Ibérica se encuentra ampliamente desarrollado en las Cordilleras Béticas, en la Cordillera Ibérica y la Cordillera Cantábrica.

#### 12.3.2. Jurásico

- No se producen fenómenos de importancia.
- Hay una gran transgresión marina y Europa queda convertida en un gran archipiélago. El continente de Gondwana se escinde en dos: Africo-Brasileño y el Australiano-Indo-Malache, del que luego se separa Australia, la India y la Isla de Madagascar.
- Predominan las rocas calizas, margas, calizas dolomíticas y calizas litográficas (de gran muy fino).
- Abundan los Corales, Equínidos, Lamelibranquios, Gasterópodos. Es el apogeo de los Amonites y Belemnites. Hay un gran desarrollo de los reptiles (dinosaurios) y aparecen las primeras aves, insectos y peces teleosteos.

#### 12.3.3. Cretácico

- Hacia la mitad de este periodo tiene lugar la gran Transgresión Cenomanense, en virtud de la cual casi toda Europa, incluida la Meseta Ibérica, quedó bajo las aguas hasta su retirada por medio de una regresión que tiene lugar al final de la Era Secundaria.
- Se separa la India del bloque Indomalache y empieza la separación de América del Sur.
- Predominan las rocas calizas, la creta, margas y arcillas. En algunos puntos se encuentran arenas y arcillas con lignitos.
- Aparecen y desaparecen en este periodo los Rudistas. Se encuentran en decadencia y desaparecen al final del período los Amonites y Belemnites. También desaparecen los grandes reptiles. Son fósiles importantes las Orbitolinas y los equinodermos. Se desarrollan las Angiospermas o Fanerógamas.

#### 12.4. ERA TERCIARIA O CENOZOICA

El límite inferior de la Era Terciaria, viene indicado por un cambio importante de la fauna del Cretácico, así como por un cambio relativo en los tipos de rocas sedimentarias originadas en este periodo.

Mientras que en el periodo Cretácico y Jurásico predominan los sedimentos carbonatados, durante el Terciario predominan los sedimentos de carácter detrítico: arcillas, areniscas y conglomerados, calizas fosilíferas, etc.

Desde el punto de vista paleontológico el Terciario comienza con la aparición de calizas con Nummulites en las facies marinas. Estos fósiles son Foraminíferos que no existían durante el Mesozoico.



El límite superior, entre la Era Terciaria y la Cuaternaria, viene definido por la presencia de sedimentos de origen glacial en el cuaternario y por la aparición de restos fósiles de homínidos.

La Era Terciaria se divide en Paleógeno (Plioceno y Mioceno) y Neógeno (Oligoceno y Eoceno).

Desde un punto de vista litológico los terrenos terciarios, geológicamente recientes, están formados por rocas que frecuentemente no están consolidadas del todo: arcillas, arenas, gravas, aunque también son abundantes rocas consolidadas tales como calizas, areniscas y conglomerados; también abundan rocas evaporizas: sales haloideas y yesos.

Una característica importante es el mayor desarrollo de los sedimentos en comparación con la Era Secundaria. Esto se debe a dos razones: una, que el mar ha ocupado zonas menos extensas que durante el Mesozoico; y otra, que ha habido menos tiempo para que estos sedimentos sean destruidos por la erosión. La duración de la Era Terciaria es menor que la de la Era anterior.

Esta era se caracteriza por la abundancia de fósiles marinos, animales y plantas, éstas muy parecidas a la flora actual. Las diferencias faunísticas con respecto al Cretácico son muy acusadas.

Desaparecen los Anmonites, Belemnites, Rudistas y Reptiles gigantes (Dinosaurios y Ptosaurios).

Se desarrollan ampliamente: Nunmulites, Equínidos, Pelecípodos, Gasterópodos y numerosas especies de Foraminíferos (Globigerinas, Alveolinas). Los mamíferos placentados experimentan también un gran desarrollo.

En cuanto a la flora terciaria, hay un gran predominio de las plantas Fanerógamas. También abundan las Algas y los Corales.

Durante la Era Terciaria hay una gran actividad orogénica. Tiene lugar la gran Orogenia Alpina, que da lugar a la mayor parte de las grandes cordilleras actuales.

#### 12.4.1. Distribución del terciario en España

##### *Paleógeno*

Afloran estos terrenos Vertiente Sur del Pirineo (Mitad septentrional de la cuenca del Ebro) hasta la Cordillera Costero-Catalana. También en las cuencas terciarias continentales de las cuencas del Duero y del Ebro y en las cordilleras Béticas.

##### *Neógeno*

En la región Levantina, Albacete, Jaén, Valle del Guadalquivir y en los depósitos de facies marina.

En las cuencas continentales destacan las dos submesetas castellanas, valle del ebro, cuenca del Almazán-Calatayud, Teruel.

#### 12.5. ERA CUATERNARIA O NEOZOICO

Esta Era abarca desde la Era Terciaria a la actualidad. Su límite inferior viene definido por la aparición de glaciaciones, que no habían tenido lugar durante el Plioceno. En Europa este límite viene señalado por la aparición de nuevos mamíferos tales como Equus y Elephas.

También el criterio tectónico puede delimitar el límite Terciario/Cuaternario dado que en la era cuaternaria es completamente inactiva desde el punto de vista orogénico, en comparación con los fuertes plegamientos de la era precedente.



Desde el punto de vista cronológico el Cuaternario se divide en dos unidades:

- **Pleistoceno.** Comprende el periodo de tiempo transcurrido desde el inicio del cuaternario hasta el final de la última glaciación.
- **Holoceno.** Comprende el tiempo transcurrido desde la última glaciación hasta la actualidad.

Los sedimentos característicos son de tipo continental. Dentro de estos sedimentos continentales se pueden distinguir los siguientes:

- **Morrenas glaciares.** Cubren grandes zonas que en época anteriores han estado cubiertas por el hielo. Ligados a estas morrenas glaciares están los depósitos fluvio-glaciares con materiales procedentes de aquellas morrenas.
- **Terrazas fluviales.** Son los depósitos dejados a ambos lados de los cauces de los ríos, a diversas cotas sobre el nivel actual del agua, por sucesivos procesos de erosión, transporte y depósito. Los materiales de las terrazas son gravas, arenas, limos y arcillas. Así mismo, son cuaternarios los materiales existentes en los fondos de valles en los cauces de los ríos.
- **Depósitos de loess.** Son materiales grano muy fino de carácter eólico depositados en condiciones climáticas de tipo estepario.
- **Dunas consolidadas.** Son formaciones propias de zonas costeras formadas por arenas y de áreas continentales desérticas o semidesérticas que cambian de lugar y orientación en función del viento.
- **Depósitos de cuevas.** Están constituidos por calizas travertínicas, estalactitas y estalagmitas. Dentro de los sedimentos marinos podemos señalar los depósitos de playas levantadas, terrazas marinas y los Arrefices costeros.

Los restos fósiles del cuaternario, animales y vegetales, son casi de los mismo grupos biológicos existentes en la actualidad y, también, parecidos a los del Plioceno.

Son importantes los gasterópodos continentales, que dan buenos fósiles de facies. Los mamíferos adquieren una gran importancia ya que son utilizados para establecer una cronología del Cuaternario. Los más interesantes son los rinocerontes, elefantes, equidos y rumiantes.

Un grupo sumamente importante es el de homínidos, que comprende desde los restos más antiguos al Homo Sapiens.

Así mismo se usan como datos de la cronología relativa todos los restos procedentes de la industria lítica, propia de la actividad humana en los tiempos prehistóricos.

Las glaciaciones constituyen el rasgo más característico de la Era Cuaternario. Extensas superficies de la Tierra quedaron cubiertas por hielo varias veces consecutivas durante el Cuaternario. Cada una de estas etapas glaciares está separada de la siguiente por un periodo interglacial, por aumento de las temperaturas.

Se han señalado cuatro grandes periodos glaciares, glaciaciones, durante el cuaternario. De más antigua a más moderna reciben los siguientes nombres: Gunz, mindel, Riss y Wurm.

Las causas de estas grandes glaciaciones no se reconocen por completo. Parece que han actuado factores variados, incluso al mismo tiempo.



ERA ARCAICA	Arcaico
	Precámbrico
ERA PRIMARIA O PALEOZOICA	Cámbrico
	Ordovícico
	Silúrico
	Devónico
	Carbonífero
	Pérmico
ERA SECUNDARIA O MESOZOICA	Triásico
	Jurásico
	Cretácico
ERA TERCERA O CENOZOICA	Plioceno
	Mioceno
	Oligoceno
	Eoceno
ERA CUATERNARIA O NEOZOICA	Pleistoceno
	Holoceno