UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Construcción Civil

Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución

Tesis para optar al titulo de Constructor Civil.

Profesor Patrocinante: Sr. Luis Collarte Concha - Ingeniero Civil - Universidad Católica de Chile.

Carolina Alejandra Arancibia Galleguillos
Valdivia Chile 2003

Contenido

Dedicatoria .	1
Agradecimientos .	3
RESUMEN .	5
SUMMARY .	5
INTRODUCCION .	7
1 ANTECEDENTES GENERALES:	7
2 OBJETIVO	7
3 PROCEDIMIENTO DE TRABAJO	8
4 CONTENIDO .	8
CAPITULO I. FORMACION EL SUELO .	9
1 LA ROCA COMO FACTOR FORMADOR	11
2 EL CLIMA COMO FACTOR FORMADOR	11
3 EL RELIEVE COMO FACTOR FORMADOR .	14
4 LOS ORGANISMOS COMO FACTORES FORMADORES	15
5 EL TIEMPO COMO FACTOR FORMADOR	16
CAPITULO II. CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES MINERALES	. 19
1 DEFINICIONES BÁSICAS	19
2 CLASIFICACIÓN DE MINERALES	20
3 CARACTERIZACIÓN DE MINERALES	21
CAPITULO III. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	41
1 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTICULAS DEL SUELO	41
2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	48
CAPITULO IV. IDENTIFICACIÓN Y RELACIÓN DE RESULTADOS DE LABORATORIO	55
1 IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.	55
2 ESTIMACIÓN DEL CAMBIO VOLUMÉTRICO PROBABLE .	61
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS .	63

CAPITULO V. CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFIA .	77

Dedicatoria

"Dedicada a mi madre por su esfuerzo, a mi padre, abuela y abuelo que siempre he llevado en mi corazón y por sobre todo a Dios que me ha dado todo lo que soy".

Arcillas exp ejecución	ansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil	
2	Arancibia Galleguillos, Carolina Alejandra	

Agradecimientos

Al finalizar esta etapa tan importante no puedo dejar de agradecer a todas las personas que hicieron posible que pudiera lograr éste sueño que hoy estoy realizando gracias a Dios.

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre que siempre me ha apoyado, brindándome una palabra de ánimo, las cuales me ayudaron a seguir siempre adelante.

Gracias al hombre que me conquistó cuando ingrese al campo laboral, Armandito porque junto a ti he pasado momentos inolvidables y hoy puedo ver como mis sueños se hacen realidad a tu lado, gracias por el amor, sinceridad, apoyo y seguridad que siempre me entregas. Te amo.

Como no recordar a mis compañeros, amigos y sus padres, ya que junto a ustedes compartí gratos momentos, además de las largas noches de estudio; porque siempre tuvieron un gesto, una palabra de cariño y el apoyo incondicional en los momentos más difíciles. A ustedes que hoy y siempre los recuerde, Bencho Molina, Rodrigo Fernández, Víctor Herrera, Carlos Barahona, Ricardo Montory, Ricardo Pinilla, Cristian Rybertt, Yamily Labra, Myra Hernández, Julia González, Tamarita Labra, Jessica Navarro, les doy las gracias por estar siempre en el lugar y a la hora precisa, gracias por las lágrimas, comprensión y felicidad, y sobre todo gracias por entregarme el calor de sus hogares y hacerme sentir un integrante más de sus familias.

Agradezco sinceramente a la Señora Taty, ella siempre me atendió con una sonrisa amorosa y dispuesta a ayudar en todo lo que necesité, también a los profesores, los cuales siempre tuvieron una buena disposición para responder mis consultas en las asignaturas a lo largo de mi periodo universitario, al igual que los profesionales que me ayudaron a realizar esta tesis. Gracias por no olvidar que una vez fueron estudiantes y también necesitaron información.

No puedo dejar de mencionar a las personas importantes que ya no están conmigo, a mi padre que ve en mi su sueño realizado; a mi abuela que siempre se entregó por completo como una madre, dándome cariño, confianza, comprensión y amistad; a mi abuelo, que me otorgó el amor y comprensión de un segundo padre. A ustedes que hoy no están aquí a mi lado compartiendo la alegría de una etapa terminada gracias por todo lo que me dieron y enseñaron, ustedes saben que siempre estarán presentes en mis recuerdos y en mi corazón, los amo mucho.

Por último gracias a Dios por guiar mis pasos por una senda la cual hoy toma otro camino que deseo seguir recorriendo siempre junto a tí.

Arcillas expe	ansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil
4	Arancibia Galleguillos, Carolina Alejandra

RESUMEN

Algunos suelos, aunque se encuentran sujetos a cargas externas constantes, presentan grandes cambios de volumen al cambiar el contenido de agua. En verano, los materiales se contraen y con las lluvias las aguas se infiltran a través de los poros y las arcillas, de acuerdo a su composición mineralógica pueden dispersarse. Este hinchamiento puede afectar a estructuras realizadas por el hombre o al relieve natural, y al desarrollarse generan presiones importantes, que originan movimientos diferenciales del terreno con hinchamientos y asentamientos que afectan las estructuras que soportan, así como al relieve natural, generando deslizamientos.

Considerando lo anterior, la identificación de las arcillas expansivas tienen un rol importante desde el punto de vista de la ingeniería, para evitar o solucionar los problemas que ellas provocan.

SUMMARY

Somesoils, although they are subject to constant external loads, present big changes of volume when changing the content of water. In summer, the materials contract and with the rains the water infiltrate through the pores and the clays, according to their mineralogy composition, can be dispersed. This increase of volume can affect structures carried out by theman or the natural relief, and when they developed, generate important pressures

that originate differential movements of the land with increases of volume and decreasethat affect the structures that support, as well as to the natural relief, generating slips.

Following, the identification of the expansible clays have an important role from the point of view of the engineering, to avoid or solve the problems that they cause.

INTRODUCCION

1.- ANTECEDENTES GENERALES:

La idea de este tema nace de la inquietud que se presenta al momento de observar la Urbanización del Club de Golf Las Brisas de Chicureo, en Colina, Santiago, donde existe una gran cantidad de Arcillas expansivas, y fue posible ver en terreno los destrozos y problemas que ellas ocasionaban, de acuerdo a esto me parece que cualquier información que se pueda obtener para evitar tanto grietas en asfalto como el deterioro de viviendas, será de mucha utilidad para al menos tener una referencia que en el terreno que estamos trabajando puede presentar complicaciones posteriores a la construcción.

2.- OBJETIVO

El objetivo que se persigue es lograr establecer alguna relación entre los resultados de ensayos comúnmente realizados a las muestras de suelo de una obra, para saber si nos encontramos frente a arcillas expansivas con el fin de prevenir posibles complicaciones.

A lo largo del desarrollo de esta tesis se entrega información al lector para que se

interiorice del tema de las arcillas expansivas, desde la perspectiva de los minerales que la componen y la relación que se puede establecer para lograr reconocerla.

3.- PROCEDIMIENTO DE TRABAJO.

- Compilación de información referente a: formación del suelo, minerales que lo constituyen, métodos de clasificación, ensayos frecuentemente realizados en mecánica de suelos.
- · Identificar los minerales arcillosos que producen la expansión del suelo.
- Estudiar los resultados entregados por los ensayos realizados a muestras de suelos arcillosos.
- Establecer si es posible determinar una relación entre los resultados de ensayos tradicionales en mecánica de suelos.
- · Elaboración de conclusiones.

4.- CONTENIDO

- · INTRODUCCIÓN: (Antecedentes Generales, Objetivos, Procedimiento de Trabajo, Descripción del contenido).
- · CAPITULO I: Formación del Suelo: (Factores formadores).
- CAPITULO II: Caracterización y Descripción de los principales minerales: (Definiciones, Clasificación y Caracterización de Minerales).
- CAPITULO III: Clasificación de los Suelos: (Características, Morfología y Composición de una Partícula de Suelo, Clasificación de los Suelos).
- CAPITULO IV: Identificación y Relación de Resultados de Laboratorio: (Identificación de arcillas expansivas, Estimación del Cambio Volumétrico Probable, Análisis de resultados de ensayos).
- · CAPITULO V: Conclusiones.

CAPITULO I. FORMACION EL SUELO

El suelo procede de la roca madre, la cual se altera por la acción de los factores ambientales y en su formación se desarrollan una serie de procesos que transforman el material original hasta darle una morfología y propiedades propias.

Los cambios se producen tanto en el ámbito de alteración de los granos de los minerales como en lo referente a su organización (estructura).

La alteración del material original comienza por un cambio en la coloración, aparecen coloraciones amarillas y pardas, muy tenues al principio y luego se van acentuando.

Además comienzan a desarrollarse pequeñas grietas muy estrechas y de paredes ajustables, que progresivamente se van ensanchando y haciéndose menos regulares y de morfología más compleja.

Después aparece el plasma (o masa basal) rellenando parcialmente los huecos, pero al principio sin que se produzcan reorganizaciones, las movilizaciones o carecen de importancia o son inexistentes en esta etapa.

Desde el punto de vista de la alteración mineral la transformación comienza afectando a los minerales más inestables.

El material se vuelve más o menos suelto, de aspecto polvoriento. Se produce la desagregación de la roca, los cristales se separan unos de otros, pero conservando en gran medida el volumen inicial y manteniendo en cierta medida, la organización primitiva de roca. A este estado de alteración se le llama saprolita.

En la fase final la transformación es tan intensa que el material adquiere una morfología propia. Se forma el suelo. En el ámbito de organización los cambios conducen a la pérdida total de la estructura de roca. Los minerales que en las etapas anteriores se habían fragmentado pero que permanecían in situ, formando entidades individuales, ahora se han movilizado y desplazado a distancias variables. Los minerales se reorganizan, se unen entre sí y a la fracción orgánica y forman nuevos agregados estructurales. Las movilizaciones de sustancias adquieren en esta fase un papel predominante.

Como resultado de la intensa alteración el plasma se vuelve muy abundante y llega a constituir una especie de masa basal que engloba a los demás constituyentes. Por otra parte, la porosidad aumenta espectacularmente, lo que conlleva un aumento de volumen considerable.

A nivel de alteración se observa una transformación profunda de los minerales de la roca madre. Se alteran ya los más resistentes, como los feldespatos potásicos (ortosa)y permanece sólo el cuarzo que es muy inalterable (sólo se fragmenta). Se produce en esta etapa final una importante formación de nuevos minerales edáficos (que no existían en la roca madre) que se acumulan en la fracción arcilla.

En esta etapa los organismos se implantan en este medio, lo transforman e incorporan sus residuos y sus propios cuerpos al morir. Estos restos orgánicos sufren unos profundos cambios hacia otros compuestos más estables.

En resumen, en la secuencia de transformación de la roca a suelo se producen progresivos incrementos de: fragmentación, porosidad, alteración mineral, material fino, materia orgánica y de estructura edáfica.

Esta claro que la roca, con su aporte masivo de minerales, será un factor importante en la formación del suelo, además de restos vegetales y animales, por tanto, los organismos también constituyen un factor importante si se comparan los suelos de las regiones húmedas y los de las regiones áridas salta a la vista el importante papel que juega el clima en la formación del suelo. Por otra parte, si analizamos la distribución de los suelos en una zona montañosa, observaremos como los suelos se encuentran escalonados en el paisaje. Por último, es evidente que los cambios que se producen en el material para pasar de roca a suelo necesitan para desarrollarse que transcurra un determinado tiempo y este tiempo representa el quinto y último factor en la formación del suelo.

El suelo puede ser considerado como una determinada combinación de sus factores formadores. Esta concepción del suelo fue expresada por primera vez por Jenny en 1940 según la siguiente ecuación:

$$S = f(cl, o, r, p, t).$$

Representando "S" al suelo, "f" es una función, "cl" al clima, "o" a los organismos, "r" al relieve, "p" a la roca madre y "t" al tiempo.

Esta ecuación es muy importante pues representa que para una determinada combinación de los factores formadores sólo puede existir un tipo de suelo. Igualmente importante es que la magnitud de cualquiera de las propiedades del suelo, tales como

pH, contenido en arcillas, porosidad, etc., está determinada por la combinación de estos factores formadores.

1.- LA ROCA COMO FACTOR FORMADOR

La roca representa la fuente de los materiales sólidos. Generalmente, los minerales del suelo proceden directamente o indirectamente de la roca madre.

Son muchos los parámetros de la roca que inciden en la formación y evolución de los suelos, pero de ellos podemos destacar claramente a tres.

Composición mineralógica, Permeabilidad, Granulometría.

Los materiales de granulometría grosera, los arenosos, van a presentar una gran estabilidad frente a la alteración. Cuanto mayor sea el tamaño del grano menos representará la superficie frente al volumen total del grano y por tanto menos superficie de ataque presentarán a la agresión del medio.

Por otro lado la granulometría gruesa da lugar a materiales muy porosos, con poros lo suficientemente grandes como para la rápida circulación del agua (al ser grandes los granos dejan al empaquetarse huecos de tamaño también grande).

Los materiales arcillosos ofrecen unos comportamientos opuestos, mientras que los materiales de granulometrías equilibradas dan resultados intermedios.

2.- EL CLIMA COMO FACTOR FORMADOR

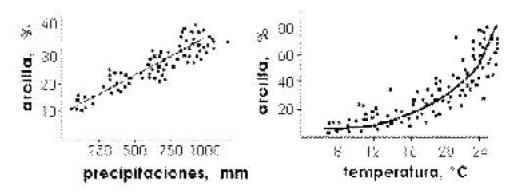
La decisiva acción del clima en la formación del suelo se desprende al considerar que el clima va a regular el aporte de agua al suelo, así como su temperatura.

Por otra parte el clima también influye directamente en otros factores formadores, como es el factor biótico y el relieve.

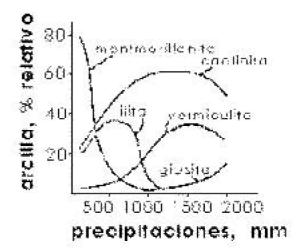
La disponibilidad y el flujo de agua regulan la velocidad de desarrollo de la mayoría de los procesos edáficos. Es por ello que la intensidad de percolación (infiltración) se considera un factor decisivo en la formación del suelo (condicionada por factores climáticos, cantidad y distribución anual de las precipitaciones, y algunos parámetros edáficos, como la permeabilidad). La intensidad de percolación nos va a indicar si en un suelo se produce suficiente exceso de agua como para producir el lavado y la translocación de materiales o si por el contrario el agua queda retenida sin que apenas se desplace hacia los horizontes profundos. La intensidad de la alteración, la clase de procesos que se presentan, el tipo de horizontes que se formen y el espesor del suelo va a ser muy diferente según que los suelos sean percolantes (abundante infiltración de agua) o subpercolantes.

Acción del clima sobre los constituyentes

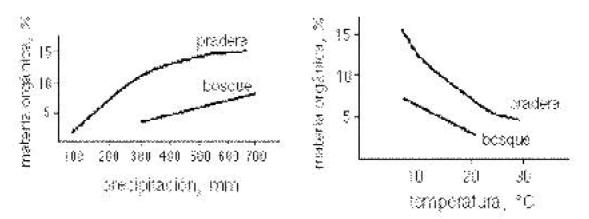
La cantidad de arcilla presente en un suelo aumenta con las precipitaciones y con la temperatura (ambos favorecen la alteración).



Pero también existe una relación entre el tipo de minerales presentes en esta fracción y las precipitaciones.

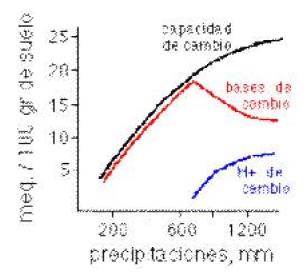


Igualmente se encuentra una marcada relación entre los elementos climáticos con el contenido en materia orgánica y su grado de evolución. En líneas generales, al aumentar la precipitación aumenta los porcentajes de materia orgánica (aumenta el desarrollo de la cobertura vegetal y, por tanto, sus aportes), mientras que al aumentar la temperatura disminuye el contenido de materia orgánica (prevalece la destrucción frente al aporte).

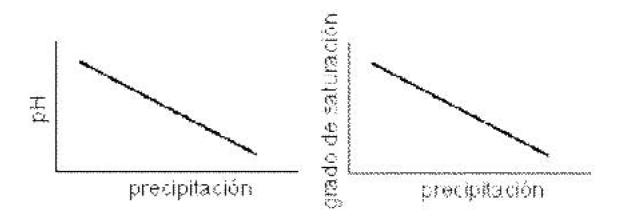


Influencia del clima en las propiedades del suelo

Las acciones del clima también quedan reflejadas en muchas de las propiedades del suelo. La capacidad de cambio (cantidad de iones adsorbidos en las superficies de los materiales del suelo) aumenta proporcionalmente a las precipitaciones, e incluso los iones fijados en las posiciones de cambio también muestran una dependencia.



Por otra parte al aumentar las precipitaciones se producirá una progresiva acidificación, la cual irá acompañada de la correspondiente desaturación del complejo de cambio (los hidrogeniones van sustituyendo al Ca, Mg, Na y K).



3.- EL RELIEVE COMO FACTOR FORMADOR

Desde el punto de vista edáfico los elementos del relieve más importantes son la inclinación y longitud de las laderas, la posición fisiográfica y la orientación.

Acciones del relieve

El relieve ejerce tres acciones fundamentales para la evolución del suelo.

Transporte

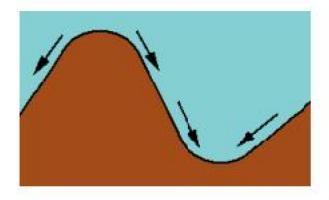
Por la acción de la gravedad, en el relieve se produce el transporte de todo tipo de materiales que se trasladan pendiente abajo. Dependiendo de su posición en el paisaje, el suelo se ve sometido a la acción de erosión o por el contrario puede predominar la acumulación.

En las zonas altas, sobre todo en las áreas en que se presentan fuertes inclinaciones, el suelo está sometido a una intensa erosión, por lo que la posición se considera residual y estará conformada por suelos esqueléticos.

Características hídricas

El relieve también influye en la cantidad de agua que accede y pasa a través del suelo.

En relieves convexos el agua de precipitación circula por la superficie hacia las zonas más bajas del relieve y se crea un área de aridez local, mientras que lo contrario ocurre para las formas con relieve cóncavo.

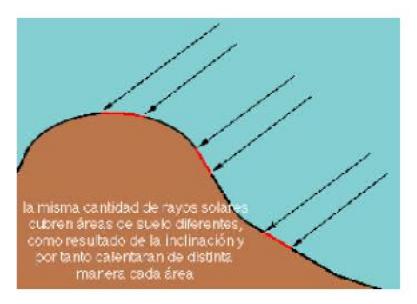


También el drenaje del suelo se verá influenciado por el relieve, ya que este influye decisivamente en la textura, que a su vez condicionará en gran parte la permeabilidad. En las áreas altas tendremos un drenaje vertical rápido, que pasará a oblicuo en las laderas y quedará muy impedido en las depresiones.

Por otra parte la posibilidad de aporte de agua a través de niveles freáticos también estará condicionada a la posición del suelo en el relieve.

Microclima

El relieve también modifica las características del clima edáfico, al influir en la temperatura y en la humedad en función de la inclinación (influirá en la intensidad calorífica de las radiaciones recibidas), orientación (que regulará el tiempo de incidencia de las radiaciones solares) y altitud (que influirá en los elementos climáticos generales).



Como consecuencia de todo ello también afectará al desarrollo de la vegetación y de la actividad microbiana.

4.- LOS ORGANISMOS COMO FACTORES

FORMADORES

Acciones de los organismos

Básicamente los organismos ejercen tres acciones fundamentales:

- Constituyen la fuente de material original para la fracción orgánica del suelo. Restos vegetales y animales que al morir se incorporan al suelo y sufren profundas transformaciones.
- Ejercen importantes acciones de alteración de los materiales edáficos. Los organismos transforman los constituyentes del suelo al extraer los nutrientes imprescindibles para su ciclo vital. El papel de los microorganismos en la transformación de la materia orgánica es tan importante como para que la humificación apenas se desarrolle en su ausencia.
- · Producen una intensa mezcla de los materiales del suelo como resultado de su actividad biológica.

Efectos sobre los constituyentes y propiedades

- El tipo y abundancia de la materia orgánica del suelo está directamente relacionada con los organismos del mismo.
- Favorecen el desarrollo y estabilidad de la estructura (como consecuencia directa de su circulación a través del suelo y también al excretar residuos de intenso poder agregante).
- · Aumentan la porosidad del suelo.
- · Favorecen el drenaje.
- · Influyen en el microclima (la vegetación produce sombra y disminuye la evaporación , aunque también consumen gran parte del agua del suelo).
- Protegen al suelo de la erosión. Por efecto mecánico (la cobertura vegetal, así como los restos acumulados sobre la superficie, protege a éste de los impactos de las gotas de lluvia) o por el poder de agregación que unen a las distintas partículas del suelo y así quedan fuertemente retenidas.

5.- EL TIEMPO COMO FACTOR FORMADOR

Como hemos visto el suelo, se origina por una serie de procesos y cada uno de ellos se desarrolla con muy diferente velocidad. Como consecuencia las propiedades del suelo, que son el resultado de la actuación de los procesos, se manifestaran también de un modo desigual.

Velocidad de formación del suelo

La velocidad de formación de un suelo es extraordinariamente lenta y depende del

tipo de factores formadores de cada suelo. Así los suelos se desarrollaran más fácilmente sobre materiales originales sueltos e inestables que a partir de rocas duras y constituidas por minerales estables. También es lógico esperar una más rápida formación en los climas húmedos y cálidos que en climas secos y fríos. Por ello la velocidad de formación del suelo es muy variable.

Arcillas expe ejecución	ansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil
18	Arancibia Galleguillos, Carolina Alejandra

CAPITULO II. CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES MINERALES

1.- DEFINICIONES BÁSICAS

Es muy complejo restringir todo en una simple definición. Esto es especialmente cierto en el mundo de la mineralogía y frente a cualquier definición, por muy elaborada que parezca, siempre es posible encontrar casos y situaciones que parecen ponerla en duda. A pesar de ello a continuación se presentan algunas definiciones.

Mineral: elemento o compuesto químico que normalmente es cristalino y que se ha formado como resultado de procesos geológicos.

Substancias antropogénicas: son aquellas producidas por el hombre, y no son consideradas como minerales. Si tales substancias son idénticas a minerales, ellas pueden ser referidas como "equivalentes sintéticos" de los minerales en cuestión.

Substancias biogénicas: son compuestos químicos producidos totalmente por procesos biológicos sin un componente geológico (ej. cálculos renales, cristales de

oxalato en tejidos de plantas, conchas de moluscos marinos, etc.) y no son considerados como minerales. No obstante, si los procesos geológicos estuvieron involucrados en la génesis del compuesto, entonces el producto puede ser aceptado como mineral.

Cristalinidad: el término "cristalino", como se usa generalmente en mineralogía, significa orden atómico a una escala que pueda producir un diagrama de difracción que se le pueda poner índices (índices de Miller) cuando la substancia es atravesada por una radiación con una longitud de onda determinada (rayos X, electrones, neutrones, etc.).

Especie mineral: individuos minerales que se caracterizan por una estructura cristalina determinada y por una composición química, que pertenecen a un rango de variaciones continuas y que se encuentran en equilibrio bajo unas condiciones termodinámica determinadas.

2.- CLASIFICACIÓN DE MINERALES

Los primeros intentos de clasificación de los minerales se remontan a los tratados clásicos de la antigüedad. No obstante, los principios de la clasificación actual de los minerales, basados en la química de los minerales, fueron establecidos por el químico y mineralogista sueco **Bercelus** entre 1779 y 1848.

El mismo concepto fue posteriormente desarrollado en la clasificación de minerales de **J. D. Dana** a mitad del siglo XIX, cuando todos los minerales fueron divididos en clases, en función de sus aniones o grupos de aniones predominantes.

El desarrollo de las técnicas de difracción de rayos X permitió que las estructuras cristalinas fueran conocidas y por lo tanto empleadas para las clasificaciones mineralógicas. La introducción de este criterio permite precisar y crear subdivisiones dentro de las clases definidas según criterios químicos. Tal es el caso de las divisiones dentro de la clase de los silicatos, basados en criterios cristalográficos.

Resumiendo los principales grupos de minerales obtenemos:

- 1. ELEMENTOS NATIVOS
- 2. SULFUROS
- 3. SULFOSALES
- 4. ÓXIDOS
- (a) SIMPLES Y MÚLTIPLES
- (B) HIDRÓXIDOS
- 5. HALUROS
- 6. CARBONATOS
- 7. NITRATOS
- 8. BORATOS

- 9. FOSFATOS
- 10. SULFATOS
- 11. WOLFRAMATOS
- 12. SILICATOS

3.- CARACTERIZACIÓN DE MINERALES

3.1.- ELEMENTOS NATIVOS

A esta clase pertenecen aquellos minerales compuestos básicamente por un único elemento químico. Sólo unos 20 elementos de la tabla periódica han sido encontrados en la naturaleza en estado nativo. Estos elementos se dividen en tres subclases: los metales, los semimetales y los no metales.

Metales Nativos

Debido a su composición química sencilla y al enlace atómico de tipo metálico que presentan estos minerales, las estructuras de los metales nativos pueden describirse como simples empaquetamientos compactos de bolas de un mismo tamaño.

Semimetales Nativos

Los semimetales nativos As, Sb, Bi son isoestructurales. Sus enlaces entre átomos ya no son puramente metálicos, sino parcialmente covalentes. Dicha covalencia de los enlaces se explica por la posición de estos elementos en el grupo Va de la tabla periódica.

En comparación con los metales nativos, los enlaces entre los átomos ya no son todos iguales.

La covalencia de los enlaces explica también la menor conductividad térmica y eléctrica de los minerales de este subgrupo respecto de los metales nativos.

No Metales Nativos

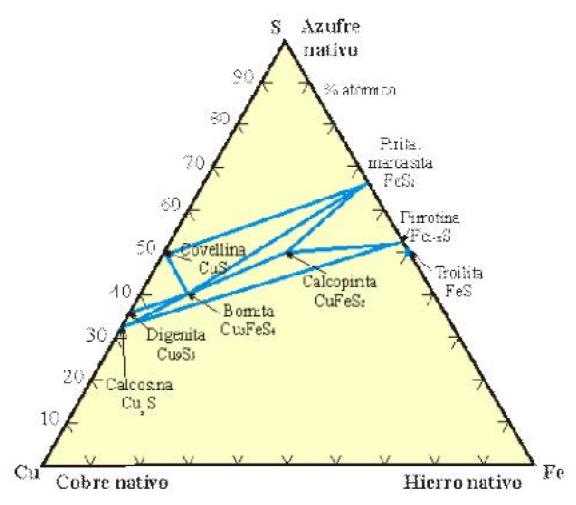
La estructura de los no metales nativos es muy diferente a la de los metales y semimetales.

ELEMENTOS NATIVOS MAS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula
METALES		
Grupo del oro	Oro	Au
	Plata	Ag
	Cobre	Cu
Grupo del platino	Platino	Pt
Grupo del hierro	Hierro	Fe
	Kamacita	Fe, Ni
	Taenita	Fe, Ni
	Mercurio	Hg
SEMIMETALES		
Grupo del arsénico	Arsénico	As
	Antimonio	Sb
	Bismuto	Bi
NO METALES		
	Azufre	S
	Diamante	С
	Grafito	С

3.2.- SULFUROS

Los minerales de esta clase son en su mayoría opacos, con colores vivos y con rayas de colores característicos. Aquellos minerales no opacos (*cinabrio, rejalgar, oropimiente o esfalerita*) tienen índices de refracción elevados y son transparentes, únicamente, en secciones finas. En la siguiente figura se presentan las composiciones químicas de algunos de los sulfuros más importantes.



La fórmula general para sulfuros es X $_m$ Z $_n$, donde X representa el elemento metálico y Z el elemento no metálico.

SULFUROS MÁS IMPORTANTES SULFUROS Y ANALOGOS

Acantita	Ag ₂ S
Arsenopirita	FeAsS
Bismutina	Bi 2 S
Bornita	Cu ² FeS ,
Calcopirita	CuFeS , T
Calcosina	Cu ₂ S ²
Cobaltita	Cu ₅ FeS ₄ CuFeS ₂ Cu ₂ S CoAsS
Covellina	CuS
Cinabrio	HgS
Esfalerita	(Zn,Fe)S
Estannita	Cu ₂ FeSnS ₄ Sb ₂ S ₃ PbS
Estibina	Sb 2 S 3
Galena	PbŚ
Greenockita	CdS
Marcasita	FeS 2
Molibdenita	MoS ²
Niquelita	NiAs
Oropimente	As 2 S 3
Pentlandita	(Fe,Ni) a S a
Pirita	FeS 2 8
Pirrotina	Fe 1-x S
Rejalgar	AsS
Skuterudita	CoAs 2-3

3.3.- SULFOSALES

Como sulfosales se clasifica un grupo de minerales bastante grande, que cuenta con unas 100 especies minerales. El termino "sulfosal" proviene de la semejanza de esta estructura a la de las sales de ácidos con oxígeno, donde el oxígeno ha sido sustituido por azufre.

Las sulfosales se distinguen de los sulfuros, sulfoarseniuros y arseniuros por su estructura. En los sulfuros los átomos de S y As tienen un papel parecido al de los metales en la estructura., así por ejemplo la arsenopirita (FeAsS) puede ser interpretada como una marcasita con la mitad del azufre sustituida por arsénico. En las sulfosales, por el contrario, aparecen grupos aislados de complejos de arsénico o antimonio y azufre.

SULFOSALES MÁS IMPORTANTES

D 1 11	DI OI O
Boulangerita	Pb Sb Sb 1
Bournonita	PbCuSb\(\frac{1}{2}\)
Cilindrita	PbFeSn 4 Sb 3 2 S 16
Enargita	Cu ₂ (AsS ₄)
Estefanita	Ag 5 SbS 4
Freieslebenita	AgPbSbS
Jamesonita	Pb , Fe(Sb , S ,) ,
Pirargirita	Ag (SbS)
Polibasita	(Ag,Cu) ₂ Sb ₂ S ₁₁
Proustita	Ag (AsŠ) L
Tennantita	(Cu,Ag,Fe,Žn) ₁₂ As ₄ S ₁₃
Tetraedrita	Cu ₁₂ (SbS ₂)

3.4.- ÓXIDOS E HIDRÓXIDOS

a) Caracterización de los óxidos

A esta clase pertenecen aquellos elementos naturales en los que el oxígeno se combina con uno o más metales. Los óxidos simples, compuestos de un metal y oxígeno, presentan diferentes relaciones X/O (metal/oxígeno), tales como $\rm X_2O$, XO, $\rm X_2O_3$. Los óxidos múltiples presentan metales de distintos tamaños combinados con el oxígeno.

Entre los óxidos figuran algunos minerales de gran valor económico, al ser algunas de las principales minas de hierro (*hematites, magnetita*), cromo (*cromita*), manganesio (*pirolusita*), estaño (*casiterita*) y uranio (*uraninita*).

El tipo de vínculos entre los átomos de los óxidos es, normalmente, fuertemente iónico, en contraste con las estructuras de los sulfuros con vinculación iónica, covalente y metálica.

b) Caracterización de los hidróxidos

Las estructuras de los minerales de este grupo se caracterizan por la presencia de los grupos (OH) o de moléculas del agua H₂O en sus estructuras. Es la presencia de los grupos (OH) la que explica que los enlaces de este grupo sean, generalmente, más débiles que los de los óxidos.

OXIDOS E HIDRÓXIDOS MÁS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula
OXIDOS		
Grupo de la Hematites	Hematites	Fe 2 O 3
	Corindón	AI 2O 3
Grupo del Rutilo	Rutilo	Al 2O 3 TiO
	Pirolusita	Mn ⁴⁺ O ₂
	Casiterita	SnO 2
Grupo de la Espinela	Espinela	MgAÍ ₂ O ₄
	Gahnita	ZnAl 20 4 - 2+2- 4+
	Magnetita	Fe 2 Fe 3 Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q Q
	Franklinita	(Zn,Mn ^{ZT} ,Fe ^{ZT})(Fe ST ,Mn
		3+) ₂ O ₄
	Cromita	Cr ₂ FeO ₄
	Uraninita	00,
	Columbita	(Fe,Mn)Nb 2 0 6
	Tantalita	(Fe,Mn)Ta 2 0 6
	Crisoberilo	BeAl 2 O 4
	Cuprita	Cu , Ō , T
	Zincita	(Zn,Mn ²⁺)O
	Ilmenita	Fe Z+ TiO 3
HIDROXIDOS		
	Brucita	Mg(OH) 2
	Diásporo	AlO(OH)
	Estibiconita	Sb ³⁺ Sb ⁵⁺ O (OH) Fe ³⁺ O(OH)
	Goethita	Fe 3+ O(OH)
	Manganita	Mn ³⁺ O(OH)

3.5.- HALUROS

La clase química de haluros se caracteriza por la preponderancia de halógenos electronegativos tales como Cl̄, Br̄, F̄ o l̄. Estos iones poseen grandes radios iónicos, tienen una carga de -1 y se polarizan fácilmente. Cuando se combinan con cationes relativamente grandes poco polarizados y de valencia baja, tanto cationes como aniones tienen las características de unos cuerpos esféricos prácticamente ideales. El empaquetamiento de estas unidades esféricas da lugar a unas estructuras de máxima simetría.

HALUROS MÁS IMPORTANTES

Mineral	Fórmula 2+ OVOLIN
Atacamita	Cu 2T 2 CI(OH) 3
Bromargirita	AgBr ²
Carnalita	KMgCl ₂ ·6H ₂ O
Fluorita	Caf
Halita	NaCl
Silvina	KCI

3.6.- CARBONATOS

Los carbonatos sin grupos (OH) agrupan un gran número de especies minerales que corresponden a los carbonatos de los metales bivalentes. Es característico que los iones con radios menores que los de Ca forman amplias series isomorfas de minerales que cristalizan en el sistema hexagonal (R3c), mientras que los iones con radios mayores que los de Ca forman carbonatos del sistema rómbico. El carbonato de calcio, por su parte , es dimorfo, es decir, puede cristalizar en uno y otro sistema.

CARBONATOS MÁS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula
Grupo de la Calcita	Calcita	CaCO 2
(Hexagonales, R <u>3</u> c)	Magnesita	MgCO
	Siderita	FeCO
	Rodocrosita	MnCO
	Smithsonita	ZnCO 3
	Esferocobaltita	CoCO
Grupo de la Dolomita	Dolomita	CaMg(CO ₂) ₂
(Hexagonales, R 3)	Ankerita	Ca(Fe,Mg, Mn)(CO 2) 2
Grupo del Aragonito	Aragonita	CaCO
(Ortorrómbicos, Pmcn)	Witherita	BaCO
	Estroncianita	SrCO 3
	Cerusita	PbCO
		,
	Auricalcita	$(Zn,Cu^{ZT})_{5}(CO_{3})_{2}(OH)_{6}$
Carbonatos con grupos (OH)	Azurita	Cu 2 (CO 2) 2 (OH) 2
(Monoclínicos, 2/m)	Malaquita	Cu 2 CO 3 (OH) 2
	Rosasita	(Cu,Zn) (CO ()(OH)

3.7.- NITRATOS

Los nitratos, en tanto que sales del ácido nítrico HNO₃, son fácilmente solubles en agua y se propagan en las formaciones contemporáneas de los desiertos cálidos, donde aparecen casi en exclusiva. El nitrógeno que presentan es de origen atmosférico.

Las estructuras de los minerales de este grupo son muy parecidas a las de carbonatos, con el grupo triangular plano NO $_3$ cumpliendo un papel equivalente al del grupo CO $_3$.

El ion N⁵⁺, fuertemente cargado y polarizado, une los tres átomos de oxígeno que le rodean en un grupo compacto, siendo los enlaces entre iones de este grupo más fuertes que los demás enlaces posibles en el cristal. Estos grupos se combinan en proporción 1/1 con cationes monovalentes, formando minerales isoestructurales con los carbonatos.

NITRATOS MÁS IMPORTANTES

Mineral	Fórmula
Nitrato de Sodio (nitratina o salitre de Chile)	NaNO 2
Nitrato de Potasio (Salitre)	KNO 3

3.8.- BORATOS

En la estructura cristalina de los boratos, los grupos ${\bf BO}_3$ pueden polimerizarse, formando cadenas, capas y grupos múltiples aislados. Este fenómeno se explica por las propiedades del pequeño ion ${\bf B}^{3+}$, que normalmente coordina tres aniones de oxígeno en un grupo triangular, de tal manera que cada oxígeno tiene una valencia libre. Esto permite a un anión de oxígeno estar entrelazado con dos boros, uniendo los grupos triangulares de ${\bf BO}_3$ en las unidades estructurales más complejas (triángulos dobles, círculos triples, cadenas y capas).

Gracias a su radio iónico, que está al limite de la estabilidad de coordinación triple, el boro se encuentra también en coordinación 4, formando grupos tetraédricos.

BORATOS MÁS IMPORTANTES

Mineral	Fórmula
Kernita	Na B A O (OH) 2.3H 2 O
Bórax	$Na_{2}^{2}B_{4}^{3}O_{5}^{3}(OH)_{4}^{2}.8H_{2}^{2}O$
Ulexita	NaCaB O (OH) .5H O
Colemanita	Ca 2 B 6 O 11 .5H 2 O 2

3.9.- FOSFATOS, ARSENIATOS y VANADATOS

El fosfato pentavalente, P⁵⁺, posee un radio iónico tan solo ligeramente mayor que el del azufre hexavalente, S⁶⁺ formando, por lo tanto, un grupo iónico tetraédrico con el oxígeno (PO ₄) . Todos los fosfatos poseen este anión complejo como unidad estructural fundamental.

En cuanto a los iones pentavalentes de arsénico y vanadio forman estructuras similares (AsO $_4$) $_5^3$ y (VO $_4$) $_5^3$ en los arseniatos y vanadatos. Los iones P $_5^5$, As $_5^5$ y V5+, con radios iónicos relativamente similares, pueden sustituirse mutuamente en los grupos aniónicos. Este tipo de sustitución se aprecia especialmente en la serie de la *piromorfita* dentro del grupo del *apatito* . La piromorfita (Pb $_5$ (PO $_4$) $_3$ CI), la mimetita (Pb $_5$ (AsO $_4$) $_3$ CI) y la *vanadinita* (Pb $_5$ (VO $_4$) $_3$ CI) son isoestructurales, pudiendo existir todos los grados de sustitución entre los compuestos puros.

FOSFATOS, ARSENATOS Y VANADATOS MAS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula
Grupo del Apatito	Apatito	Ca _F (PO _A) ₂ (F,CI,OH)
	Mimetita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH) CIPb ₅ (AsO ₄) ₃
	Piromorfita	CIPb (PO 1) 2
	Vanadinita	CIPb 5 (PO 4) 3 CIPb 5 (VO 4) 3
Grupo de la Vivianita	Eritrina	Co ₂ ,(AsO4), .8H ₂ O Fe 2 (PO 1) ₂ .8H ₂ O
	Vivianita	Fe (PO 4) 2.8H 2 O
	Adamita	$Zn_2(\check{A}sO_3)(O\check{H})$
	Ambligonita	(Li,Ña)AlPo ₄ (F,OH)
	Autunita	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2.10-12H_2O$
	Brasilianita	NaAl 2 (PO 1) 2 (OH) 1
	Carnotita	$K_{2}(10_{2})_{2}(10_{4})_{2}^{-1}3H_{2}O$ Fe $A!(10_{4})(0H)_{2}^{-1}H_{2}O$
	Childrenita	
	Conicalcita	CaCu (AsO (OH)
	Descloizita	PbZn(VO ,)(OH)
	Escorodita	Fe ASO . 2H O
	Escorzalita	(Fe ,Mg)Al $_{2}$ (PO $_{4}$) $_{2}$ (OH) $_{2}$
	Lazulita	MgAl 2 (PO 4) 2 (OH) 2
	Litiofilita	LIMIN PO
	Monacita	(Ce,La,Nd,Th,Y)PO
	Torbernita	Cu 22 (UO 2) 2 (PO 4) 2 .8-12H 2 O LiFe PO 4
	Trifilita	
	Turquesa	CuAl ₆ (PO ⁷ ₄) ₄ (OH) ₆ .4H ₂ O
	Variscita	AIPO 1.2H 0
	Wavelita	Al 3 (PO 4) 2 (OH,F) 3 .5H 2 O

3.10.- SULFATOS y CROMATOS

El grupo aniónico ${\bf SO}_{\bf 4}$ es la unidad fundamental de la estructura de los sulfatos. Mientras que en los sulfuros aparecen unos aniones ${\bf S}^{2^-}$ de gran tamaño , en los sulfatos el azufre tiene el carácter distinto. El átomo de ${\bf S}$ posee seis electrones en su capa exterior que pueden ser "arrancados", produciéndose un catión ${\bf S}^{6^+}$, de pequeño radio iónico y con carga y polarización fuertes. El ratio de radios iónicos del ${\bf S}^{6^+}$ y del oxígeno indica la estabilidad de la coordinación 4 para este grupo. Unos enlaces covalentes muy fuertes unen el oxígeno y el azufre en el grupo ${\bf SO}_{\bf A}$.

Los sulfatos más importantes y abundantes en la naturaleza son los miembros del grupo de la barita, con cationes grandes bivalentes, coordinados con grupos $SO_{\underline{A}}$.

SULFATOS Y CROMATOS MÁS IMPORTANTES

	Mineral	Fórmula
ANHIDROS		
Grupo de la Barita	Anglesita	PbSO
	Barita	BaSO
	Celestina	SrSO 4
	Anhidrita	CaSO
	Crocoita	PbCrO
	Glauberita	Na 2 Ca(SO 1) 2
HIDRATADOS Y BASICOS		2 4 2
	Alunita	K 2 AI 6 (SO 4) 4 (OH) 12
	Antlerita	Cu so (OH)
	Chalcantita	Cu 2 +SO 4 .5H 2 O
	Creedita	Ca ² Al ₂ SO ₄ (F,OH) ₄ ·2H ₂
		0 3 2 4 4 2
	Linarita	PbCu ²⁺ ₂ (SO ₄)(OH) ₄
	Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O ⁴

3.11.- WOLFRAMATOS y MOLIBDATOS

Los iones W^{6+} y Mo^{6+} son considerablemente más grandes que S^{6+} y P^{5+} . Por ello, cuando estos iones entran en los grupos anisodésmicos con oxígeno, los cuatro iones de oxígeno no se colocan en los vértices de un tetraedro regular (como en el caso de los sulfatos y fosfatos), sino forman unos grupos ligeramente elongados en la dirección del eje c.

La igualdad de los radios iónicos de W⁶⁺ y Mo⁶⁺ permite la sustitución ilimitada de uno a otro en las estructuras cristalinas de estos minerales. Pero, en la naturaleza, los procesos de diferenciación geoquímica, a menudo, separan estos dos elementos, así que los wolframatos y molibdatos puros (sin mezclas del componente contrario) no son raros en la naturaleza. En los minerales secundarios, estos dos elementos suelen formar soluciones sólidas de minerales.

WOLFRAMATOS Y MOLIBDATOS MÁS IMPORTANTES

Mineral	Fórmula
Wolframita	(Fe,Mn)WO
Scheelita	CaWO ,
Stolzita	PbWO 4
Powellita	CaMoO ,
Wulfenita	PbMoO 4

3.12.- SILICATOS

Los silicatos constituyen, seguramente, el grupo mineral más importante no solo por abarcar cerca del 25% del conjunto de minerales conocidos y el 40% de los más corrientes, sino por constituir más del 92% de la corteza terrestre en la que vivimos.



Porcentajes en volumen estimados de los minerales de la corteza terrestre tanto continental como oceánica.

Por otra parte gran parte de las materias primas necesarias a la actividad humana, especialmente los denominados minerales industriales así como los materiales de construcción, son silicatos o derivan de ellos y su importancia no va a hacer más que incrementarse con el tiempo.

El propio suelo sobre el que se desarrollan las plantas, en la base de la cadena trófica del ser humano, esta formado esencialmente por silicatos.

Estructura de los Silicatos

El tetraedro del **SiO** ₄, formado por cuatro átomos de oxígeno en los vértices de un ion de silicio tetravalente, constituye la unidad fundamental de todos los silicatos. Dicho enlace, siguiendo el concepto de electronegatividad de **Pauling**, puede ser considerado 50% iónico y 50% covalente. Este enlace es pues debido tanto a la atracción de cargas opuestas como al reparte de electrones y a la interpenetración de las nubes electrónicas de los iones. La energía total del enlace aparece igualmente distribuida entre los cuatro oxígenos más próximos, por lo que la fuerza de cualquier enlace simple silicio - oxígeno sea exactamente igual a la mitad de la energía total de enlace disponible del ion oxígeno.

Cada ion oxígeno O²⁻ puede unirse a otro catión de silicio Si⁴⁺ formando los denominados **puentes de oxígeno** que permiten fenómenos de polarización que explican la enorme variedad existente de estructuras de los silicatos.

Un tetraedro podrá así compartir ninguno, uno, dos, tres o sus cuatro oxígenos dando lugar a diferentes tipos de estructuras, a la base de la clasificación de los silicatos.

Clasificación de los Silicatos

Los silicatos con grupos tetraédricos SiO_4 independientes se denominan nesosilicatos (del griego "nesos" isla) u ortosilicatos. Aquellos con dos grupos SiO_4 conectados formando unos grupos SiO_4 se denominan sorosilicatos (del griego "soros" montón) o disilicatos.

Cuando se conectan más de dos grupos SiO $_{4}$ formándose estructuras cerradas en forma de anillos tenemos los ciclosilicatos del griego "kyklos" círculo con una composición

general del tipo Si x O 3x

Si los tetraedros de ${\bf SiO}_{\bf 4}$ se unen formando largas cadenas estamos en el grupo de los inosilicatos (del griego "*inos*" que significa hilo). Dichas estructuras en cadena pueden ser tanto simples con formula unitaria ${\bf Si}_{\bf 2}$ ${\bf O}_{\bf 6}$ como dobles verificándose una relación de ${\bf Si}/{\bf O}=4/11$.

Cuando tres de los oxígenos de un tetraedro se comparten con grupos contiguos se desarrollan estructuras en capas o láminas propias de los filosilicatos (del griego "phyllon" que significa hoja).

Por último cuando un grupo ${\bf SiO}_{\bf 4}$ comparte sus cuatro oxígenos con grupos contiguos obteniéndose estructuras tridimensionales de composición unitaria ${\bf SiO}_{\bf 2}$ se forman los denominados tectosilicatos (del griego "tecton" constructor).

Nesosilicatos

Los nesosilicatos presentan tetraedros de SiO₄ unidos entre si con enlaces iónicos por medio de cationes intersticiales cuyos tamaños relativos y cargas determinan las estructuras de los compuestos.

El empaquetamiento atómico de las estructuras de los nesosilicatos es generalmente denso lo que justifica el alto peso específico y densidad de los minerales de este tipo.

Igualmente la estructura atómica de los nesosilicatos con tetraedros libres provocan un hábito cristalino equidimensional sin direcciones de exfoliación marcadas.

Contrariamente a otros silicatos no son habituales las sustituciones de los tetraedros de ${\rm SiO}_{4}$ por cationes ${\rm Al}^{3+}$.

NESOSILICATOS MÁS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula
Grupo de la Fenaquita	Fenaquita	Be 2 SiO 4
	Willemita	Zn 2 SiO 4 Fe 2 SiO 4
Olivinos	Fayalita	Fe 2 SiO 4
	Forsterita	Mg SiO ,
	Tefroita	Mn 2+ 3iO
	Liebenbergita	(Ni,Mg) 2 SiO4
Granates	Almandino	Fe ₃ Al ² (SiO ⁴) ₃
	Andradita	Ca 3 Fe 2 (SiO 4) 3
	Espesartina	Mn 2 Al 2 (SiO 4) 2
	Grosularia	Ca 3 Al 2 (SiO 4) 3
	Piropo	Mg 3 Al 2 (SiO 4) 3
	Uvarovita	Ca 3Cr 2 (SiO 4) 3+
	Calderita	(Mn ³²⁺ ,Ĉa) ₃ (Fe ³⁺ ,Al) ₂ (SiO ₄) ₃
	Glodmanita	Ca 3 (V,AI,Fe ST)Cr 2 (SiO 4) 3
	Hibschita	Ca 3 Al 2 (SiO 4) 3-x (OH) 4x
	Katoita	
	Kinzevita	
	Majorita	Ca 3 (Fe,Al,Si) 2 (SiO ₄) 3 12 Mg 3 (Fe,Al,Si) 2 (SiO ₄) 3 12 Ca 3 Ti 2 (Fe 2,Si) 3 O 12 Mg 2 Cr 2 (SiO ₄) 3
	Schorlomita	Ca Ti $4T$ $(Fe^{2ST}$ 2 $Si)$ 3 O 12
	Knorringita	
	Zircón	Zr(SiO ,)
	Topacio	Al Sio 4 (F,OH)
	Estaurolita	(Fe ²²⁺ ,Mg,Zn) ₂ Al ₉ (Si,Al) ₄ O ₂₂ (OH) ₂
	Datolita	CaB(ŚiO ,)(OH)
	Esfena	CaTiSiO 5
	Cloritoide	(Fe,Mg) 5 Al 4 O 2 (SiO 4) 2 (OH) 4
	Euclasa	BeAISiO ₄ (OH)
Grupo Al2SiO5	Andalucita	Al SiO 5
-	Sillimanita	AI a SiO a
	Cianita	Al 2 SiO 5
Humitas	Concrodita	$Mg_{F}(SiO_{A})_{A}(OH,F)_{A}$
	Norbergita	Ma (SiO ,)(F,OH)
	Humita	$Mg_{7}(SiO_{4}^{4})_{3}(F,OH)_{3}$
	Clinohumita	$Mg \frac{3}{7} (SiO \frac{4}{4}) \frac{7}{3} (F,OH) \frac{2}{2}$ $Mg \frac{3}{9} (SiO \frac{4}{4}) \frac{3}{4} (F,OH) \frac{2}{2}$

Sorosilicatos

Los sorosilicatos se caracterizan por presentar grupos tetraédricos de ${\rm SiO}_4$ compartiendo un oxígeno en el vértice común formándose un empaquetamiento de tipo ${\rm Si2O}_7$.

SOROSILICATOS MÁS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula
	Idocrasa	(Ca 10 Mg 2 Al 4 Si 2 O 4) 3 (Si 2 O 7) 2 (OH) 4
	Prehnita	Ca, Al, Si, O, (OH), CH,
	Hemimorfita	$Zn_{\Lambda}^{2}(Si_{2}^{2}O_{\Lambda}^{3})(OH)_{2}.H_{2}^{2}O$
	Lawsonita	CaĀl , (Śi , Ó ,)(OĤ) , Ĥ , O
Grupo de la Epidota	Clinozoisita	Ca , Āl , (ŠiO ¼) , (OĤ)
	Epidota	$Ca_{2}^{2}(Fe^{3\tau},AI)_{3}^{3}(SiO_{A})_{3}^{3}(OH)$
	Allanita	$(Ce,Ca,Y)_2$ (Al,Fe ^{2T} ,Fe ^{3T})(SiO _A) ₃ (OH)
	Dissakita	Ca(Ce,La)MgAl 2 (SiO 1) 3 (OH)
	Dollaseita	CaCeMg 2 AISi 3 O 34 (F,ŎH) 2
	Hancockita	(Pb,Ca,Sr) 2 (Al,Fe 3) 3 (SiO 2) 3 (OH)
	Khristovita	Ca,REE)REE(Mg,Fe 2)AIMn 2 Si 3 O 11
		(OH)(F,O)
	Mukhinita	Ca Al V (SiO _M) (OH)
	Piemontita	Ca_{2}^{2} (Al,Mn $_{2}^{3+}$,Fe $_{2}^{3+}$) (SiO $_{4}$) (OH)
	Strontiopiemontina	CaŚr(Al,Mn ^{3T} ,Fe ^{3T}) 3Si 3O 11O(OH)
	Zoisita	Ca Al (SiO) (OH)

Ciclosilicatos

Los ciclosilicatos están formados por anillos de tetraedros entrelazados de SiO $_{\mathbf{2}}$ con una relación Si/O = 1/3, presentándose tres posibles configuraciones:

El anillo $\mathbf{Si}_{\mathbf{3}} \mathbf{O}_{\mathbf{9}}$ es muy raro, apareciendo solo en el caso de **benitoita** (BaTiSi $_{\mathbf{3}}\mathbf{O}_{\mathbf{9}}$).

El anillo \mathbf{Si}_{4} \mathbf{O}_{12} es igualmente raro, observándose en el caso de la *pagodita* $(\mathrm{Ca}_{2}\mathrm{Cu}_{2}\mathrm{Al}_{2}\mathrm{Si}_{4}\mathrm{O}_{12}(\mathrm{OH})_{6})$.

El anillo Si $_6$ O $_{18}$, por el contrario, es más habitual y está en la base de las estructuras de minerales más corrientes y usuales como el *berilo* y las *turmalinas* .

CICLOSILICATOS MAS IMPORTANTES

Grupo	Mineral	Fórmula .
	Axinita	(Ca,Fe ²⁺ ,Mn) ₃ Al ₂ BSi ₄ O ₁₆ H
	Berilo	Bo Al (Si O)
	Cordierita	(Mg,Fe)2Al4Si5O18.nH2O
	Benitoita	BaTiSi ₂ O _o
	Pagodita	Ca Cu Al Si O 12 (OH)
	Dioptasa	Cu T sib 2 (OH) 2 12
Turmalina	Chorlo	NaFe $^{2+}$ $_{2}$ Al_{6} (B O_{2})3Si $_{6}$ O $_{18}$ (OH) $_{4}$
	Dravita	NaMg Al (BO) Si O (OH)
	Elbaita	Na(Li,Ãļ) , AI c (BO ,)3Si c O , (OH)
	Buergerita	NaFe 3 3 39 (BO 3) 3 Si 6 O 21 F
	Chromdravita	NaMg(Cr,Fe) ₆ (BO ₂) ₃ Si6O ₁₈ (OH) ₄
	Feruvita	Na(Fe 24 ,Mg) $_3$ (AI,Mg) $_6$ (BO $_3$) $_3$ Si $_6$ O $_{18}$ (OH)
	Foitita	[Fe ²⁺ 2 (Al,Fe ³⁺)]Al 2 Si 2 O 40 (BO 2) 2 (OH) 4
	Liddicoatita	Ca(Li,Al) 3 Al 6 (BO 3) 3 Si 6 O 18 (O,OH,F) 4
	Olenita	NaAl Al (BO) Si O (OOH)
	Povondraita	NaFe 3+ 3 Fe 3+3 (BO 3) 3 Si 6 O 48 (OH,O) 4
	Uvita	(Ca,Na)(Mg,Fe 2 7 3 Al 5 Mg(BO 3 3 Si 6 O 18 (OH,F)

Inosilicatos

En los inosilicatos los tetraedros de ${\rm SiO}_4$ se polimerizan formando cadenas simples al compartir O de los grupos adyacentes, obteniéndose relaciones ${\rm Si/O}$ = 1/3. Esta estructura es propia de los *piroxenos* .

Si además estas cadenas se unen lateralmente compartiendo más oxígenos se forman cadenas dobles con una relación Si/O = 4/11, característica estructura de los **anfíboles**.

Anfíboles y piroxenos poseen propiedades cristalográficas, físicas y químicas muy parecidas.

Minerales análogos de uno y otro grupo comparten el color, brillo y dureza, pero no así el peso específico o índice de refracción más bajo en los anfíboles debido a la presencia del grupo OH.

Igualmente, presentan hábitos distintos, con los cristales de piroxenos en forma de prismas gruesos mientras que los anfíboles tienden a formar cristales alargados de tipo acicular.

INOSILICATOS MÁS IMPORTANTES

Entre los numerosos minerales de este grupo caben destacar:

G гарс	Serie.	Mineral	Pérmula
PIROSTHICA			
Erelab	a Cidoten colla		
		Finstatina	$Me_2Si_2\Omega_0$
		Hiperstons	(Pe*)_Mg(z\$1,O ₄
		Crticfen) sib.i	Fr ⁴⁺ ;Si ₂ O ₆
		Pigeonta	Ca _{0.25} (Mg,Fe) _{0.75} Sl ₂ O ₅
Didato	costedorabal I c.		
		ပါးထုံးအော	CaMgSigO ₀
		Hedenil a gita	CaF∪Si, O _f
		Angle	$(Ca,Na)(Mp,Fa,Afr(Si,Al)_2\Omega_0$
Pirces	ne Séclads		
		Jadeta	No(Al,Fe ¹¹)Sl ₂ O ₀
		Egroa	PkaFe³+Si₁O _f
		Espedimena	$LiAiSi_2O_i$
PIR OUTHOUT	7.3		
		Weilasteinta	CaSiO ₃
		P.oducola	MaSiO ₂
		Petitalita.	$Ca_2NaH(SiO_3)_3$
AFBOLES			
		Artoff ta	$(M_{12}, Pe)_{\pi}Sl_{\pi}O_{22}(OD)_{2}$
Cima	nglanita Guareto	n.	
		Cummingtonita	Mc-Sl ₂ O ₄₄ (OH) ₃
		Groeila	$(\operatorname{Fe}^{2s}\operatorname{JM}_{\mathbf{H}})_{\mathfrak{p}}\operatorname{Si}_{\mathbf{h}}\operatorname{O}_{\mathfrak{p}_{\mathfrak{p}}}(\operatorname{OH})_{\mathfrak{p}}$
Thema:	uta Actinolita		
		Tr÷m iti	CasMg/SigOpp(OH)p
		Petroactholita	$Ca_{2}(Fe^{24},Mg)_{5}Sl_{8}O_{11}(O)Ii_{2}$
		FeroLandinak	$Ca_{P}(Fe^{2\pi}.M\underline{e})_{1}AI(Si_{1}AI)O_{P}(OH.F)_{1}$
Anfiboles Só	dicos		
		Glaucofana	$Na_{2}(Mg_{*}J/e^{2+})_{2}Al_{2}Si_{2}O_{*2}(OH)_{2}$
		Firbce:eta	$No_2Fe^{\dagger +}{}_{2}Fe^{3-}{}_{2}Si_0O_{12}(OH)_2$
			The second secon

Filosilicatos

Los minerales de este grupo presentan estructuras de tetraedros de SiO_4 en hojas de extensión indefinida en la que tres de los oxígenos están compartidos con tetraedros vecinos resultando una relación Si/O = 2/5, con simetría senaria en cada hoja.

La mayoría de los minerales de este grupo poseen grupos OH localizados en el centro de los anillos senarios de tetraedros a la misma altura que los oxígenos de los vértices no compartidos. En la estructura de la caolinita, entre las hojas, formadas por tetraedros SiO₄, se encuentran cationes de Al en coordinación octaédrica.

Este grupo de minerales es especialmente importante al agrupar a la mayoría de los productos de meteorización de las rocas y por lo tanto a la mayoría de los constituyentes

de los suelos. Aparecen igualmente como constituyentes de rocas tales como los esquistos y ciertas rocas ígneas (caso de las micas), así como son típicos productos de alteración de feldespatos, anfíboles, piroxenos, olivinos, etc.

Unidades estructurales básicas

Los filosilicatos poseen dos tipos de capas cuya disposición relativa varía entre los diferentes grupos

Capa t: Capa tetraédrica (t: lámina de tetraedros SiO_4 enlazados).

Capa o: Capa octaédrica (o: lámina octaédrica de XO₆, X normalmente Mg o AI).

GRUPO SERPENTINA - CAOLINITA: Capas t - o enlazadas entre sí por fuerzas débiles.

GRUPO PIROFILITA - TALCO: Capas t - o - t unidas por fuerzas débiles.

GRUPO MICAS: (Capas t - o - t) - (catión) - (capas t - o - t). El Al sustituye al Si y la carga eléctrica libre es aprovechada por un catión enlazante.

Si son dos Al los que sustituyen a dos Si sobrarán dos cargas y el catión enlazante, como por ejemplo el Ca, lo hace tan fuertemente que se pierde exfoliación y flexibilidad originándose las micas frágiles (ej. *Margarita*).

Las Illitas son un conjunto de micas con menos Si sustituido por Al y con más agua. También parte del potasio se sustituye por Ca y Mg. Su formula general es $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,H_2O]$

GRUPO CLORITAS: (Capas t-o-t) - (hoja simple octaédrica) - (capas t-o-t).

GRUPO ESMECTITAS: (Capas t-o-t) - (capas de moléculas de H₂O) - (capas t-o-t). Las láminas de H2O poseen iones intercambiables entre ellas.

GRUPO SEPIOLITA: Capas t-o-t no regularmente definidas sino en franjas correspondientes a dos o tres cadenas de tipo anfibólico. Poseen moléculas de H₂O de coordinación así como de tipo zeolítico (pueden desprenderse).

Minerales de la arcilla

Es un término petrográfico que comprende a los filosilicatos alumínicos hidratados. El término caolín corresponde a la arcilla de mayor pureza (composición) en la caolinita.

FILOSILICATOS MAS IMPORTANTES

€т ц :::	Mineral	Fá-mij i
Cacinita-Serpentina	Antgonia	$\mathbf{Mgs}[(\mathrm{OH})_{8}/\mathrm{Si}_{4}\mathrm{O}_{10}]$
	Chaetile	$\mathbf{Mgs}[(\mathrm{OH})_{8}/8i_{*}\mathrm{O}_{10}]$
	Linarcht	$\mathbf{M}_{28}[(\mathrm{OH})_3/\mathrm{Si}_4\mathrm{O}_{10}]$
	Amesita	$(Mg_{i}\Gamma e^{2\tau})_{4}(Al_{i}\Gamma e^{3\tau})_{2}[(OH)_{8}/Al_{2}Si_{2}O_{10}]$
	Pickita	$AI_4[(UH)_8Si_4U_{10}]$
	Caroline sa	$\mathrm{Al}_4[(\Omega\mathbf{H})_3\mathfrak{B}_4\Omega_{10}]$
Piroflita-Taleo	Talbo	$\mathbf{Mg_{I}[(OID_{2}/Si_{4}O_{10}]}$
	Parecilità	$\mathrm{Al}_2[(\mathrm{OH})_2\mathrm{Si}_4\mathrm{O}_{10}]$
Mr. ca	Mo tovila	$KAl_2[(\Omega H)_2/\Delta [Si_3\Omega_{10}]]$
	Flogopita	$\mathbf{KMg_0}[(\mathbf{OH}_i\mathbf{F})_{\mathbf{S}^{\prime}}\mathbf{AlS}i_1\mathbf{O}_{10}]$
	Fachts K(Mg	(,Fe ²⁺) ₃₋₆₋₅ (Al,Fe ³⁺) ₆₋₁ (OH,F) ₂ /Al ₁₋₁₋₅ 85 ₃₋₂₋₅ O ₁₀
	Levidolita	$Kli_{1,4}\Delta l_{1,4}[(OH)_{0,6}F_{1,4}/\Delta l_{0,6}Si_{3,4}O_{10}]$
	1/Zarganta	$Ca.Na)Al_2[(OII)_2/Al_2Si_2O_{10}]$
	Zmrzaldra	$KliFe_{0.66}^{-2*}Al_{1.15}[F_{1.6}(OH)_{0.4}/Al_{0.75}Ni_{3.26}O_{10}]$
Conit e	Chart peita	$(Fr^{2*},M_{2},Fr^{3*})_{a}\Delta l(Si_{3}\Delta l)O_{1a}(OH,O)_{3}$
	(Plinor) are	$(Mg_sTa^2)_EAl(Si_0Al)\Omega_{10}(\Omega H)_8$
	Ortochamosits	$(\mathbf{Fe^{1+}}, \mathbf{Mg}, \mathbf{Fe^{3+}})_{!*}\mathbf{Al}(\mathrm{Si}_{2}\mathbf{Al})\mathbf{O}_{1\bullet}(\mathbf{OH}, \mathbf{O})_{3}$
	Permunica	$\mathbf{M} n^{2-} s^{-1} [\mathbf{Si}_8 \mathbf{A}] \mathcal{O}_{10} (\mathbf{OH})_8$
Earn scrites	Alietita	Mineral autillosa
	Montmorffonita	$Al_{1,6}$ $Mg_{0,10}$ [OH] g Ni $_{4}$ O $_{10}$ [Na $_{0,10}$ (H $_{2}$ 0) $_{4}$
	Noule rails.	Fe3-2[(OH)2/Al0:33823.67O10]Ne0:33(H20)4
	Saberia (P	$Mg_{s}Fe^{2\gamma}Fe^{3\gamma}g_{s}[(OH)_{2}cMg_{s3}Sig_{s}n\Omega_{10}]Nag_{s3}(H_{2}0)_{H}$

	Sautorents.	$Na_{\mathbf{k}_{2}}Ym_{3}(Ni,AI)_{4}U_{1\mathbf{n}}(OH)_{2}.4H_{2}U$
	िस्टान वीत	$(\mathrm{Ca}2)_{0,3}\mathrm{Mg}_3\mathrm{Si}_4\Omega_{10}(\Omega\mathrm{H})_2$
Vermiculta: Min	eraies oku čičnovia gral	$\mathbf{M}_{0}.\mathbf{F}e^{2+}_{i}.\mathbf{A}\mathbf{I})_{i}[(OH)_{2}/\mathbf{A}\mathbf{L}_{1}\mathbf{S}\mathbf{L}_{1}O_{10}]\mathbf{M}\mathbf{e}_{0.71}(H_{2}O)_{0}$
Septelita	Sepiolia	$\mathbf{M}_{\mathrm{Sp}}\mathrm{Sig}\mathrm{O}_{12}(\mathrm{OH})_{2}.6\mathrm{H}_{2}\mathrm{U}$
	P <u>alig</u> orski.s.	$(\mathbf{M}_{\mathbf{g}}, \mathbf{A})_2 Si_4 O_{10}(\mathbf{OH}).4\mathbf{H}_2 O$
A ze ilita	ostrofica	$(K_2,Na_2,Ca)(Fe,Mo)_4(Ti,Ze)_7[OH/Si_2O_7]_2$
	Cesio-kupletskira	$Cs_{*}K_{*}Na)_{1}(Mn_{*}Fe^{2})_{7}(Ti_{*}Nb)_{2}Si_{2}O_{24}(O_{*}OH_{*}F)_{7}$
	Hidroastrotilita	$(H_3O_2K_2Cu)_3(Ee^{2\pi}_2NIn)_{5-6}Ti_2Ni_3O_{24}(O_2OH)_{31}$
	Zus elseita	$(K_sNa)_3(Ma.Fe^{2\alpha})_7(Ti.Nb)_2Si_3O_{2\beta}(O_sOH)_7$
26	guesicastrofilta	$(Na,K)^4 M_2^{-2} (Fe^{2+},Fe^{3+},Mn)_5 Ti_2 Si_3 O_{24} (O,OH,\Gamma)_7$
	_Neobio tilit a	$(E,Na)_3(Fe^{2\alpha},Mn)_4(Nb,Fi)_2\delta I_3(U,OH,F)_7$
	Za co⊞.a	$(K_*Nu_*Cu)_3(Mu_*Fu^{2*})_2(\Sigma_1,Nu)_2Si_3O_{2^n}(O,OH)_7$
Apolitiae	Fluoroapolitica	$\mathrm{KCo}_1\mathrm{Si}_3\Omega_{20}(F_1\mathrm{OH}).\mathrm{SH}_2\Omega$
	Thérozapetihta	$\mathrm{ICCa}_{4}\mathrm{Si}_{8}\mathrm{U}_{20}(\mathrm{OH}_{4}\mathrm{P}).\mathrm{SH}_{2}\mathrm{U}$
	Is attroap oxilita.	NaCa ₂ Ni ₂ O ₂₀ ESH ₂ O
	Cripocoli,	$(Cn^{2+},\Delta I)_2H_2Si_2O_F(OH)_4.nH_2O$
	Prehiita	$Ca_2Al_2Si_1O_{10}(OII)_2$

Tectosilicatos

Los tectosilicatos presentan tetraedros de **SiO** 4 unidos entre sí compartiendo oxígenos, formando un armazón tridimensional con enlaces fuertes, verificándose relaciones Si/O iguales a 1/2.

TECTOSILICATOS MAS IMPORTANTES

Los minerales de este grupo son abundantes y representan cerca de un 64% de la corteza terrestre, entre ellos se pueden destacar:

Grupo	Subgrupo	Mineral	Fórmula
GRUPO DE LA		Cuarzo	SiO ₂
SÍLICE			
		Tridimita	SiO ₂
		Cristobalita	SiO 2
		Opalo	SiO 2 SiO 2 .nH 2 O CaB 2 (SiO 4) 2
		Danburita	CaB ² (SiÓ ₄)
FELDESPATOS			2 4 2
	Feldespatos	Microclina	KAISi 3 0 8
	Potásicos		3 8
		Ortoclasa	KAISi , O ,
		Sanidina	KAISi 3 0 8 (K,Na)AISi 3 0 8
	Plagioclasas	Albita	NaAlSi 3 0 8 CaAl 2 Si 2 0 8
		Anortita	CaAl Si O
FELDESPATOIDES			2 2 8
		Leucita	KAISI . O .
		Nefelina	(Na,K)AISiO
		Sodalita	Na Al Si O Cl
		Lazurita	Na 8 AI 6 Si 6 O CI 2 (Na,Ca) 8 (AISiO 4) 6 (SO
			4 ,S,Cl) 2 LiAlSi 4 0 10
		Petalita	LiAISi 40 40
ESCAPOLITAS			
		Marialita	Na ₄ (AlSi ₃ O ₈) ₃ (Cl ₂ ,CO ₃ ,SO ₄) Ca ₄ (Al ₂ Si ₂ O ₈) ₃ (Cl ₂ 2,CO ₃ ,SO ₄) Ca ₄ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ CO ₃
			(CO_3,SO_4)
		Meionita	Ca ₄ (Al ₂ Ši ₂ O ₈) ₃ (Cl
			2,003,504)
		Wernerita	Ca Al Si O 24 CO 3
ZEOLITAS			
		Natrolita	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ .2H ₂
		Chabazita	CaAl Si O O 6H O
		Heulandita	CaAl 2 Si 7 O 40 .6H 2 O
		Estilbita	NaCa Al Sil O 2
			CaAl 2 Si 4 O 12 .6H 2 O CaAl 2 Si 7 O 18 .6H 2 O NaCa 2 Al 5 Si 3 O 36 .14H 2 O NaAlSi 2 O 6 .H 2 O
		Analcima	NaAlŠi , O , .H , O

CAPITULO III. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

1.- CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTICULAS DEL SUELO

Como sabemos una fracción de suelo está compuesta por una serie de partículas individuales, aire y/o agua que ocupa los espacios que existen entre ellas. Debido a esto a continuación caracterizaremos las partículas en forma individual.

1.1.- MORFOLOGÍA DE UNA PARTICULA DE SUELO

Tamaño

El tamaño de las partículas que constituyen los suelos varía entre aquel de un canto rodado y el de una molécula grande.

Los granos de un tamaño mayor que unos 0.06 milímetros pueden ser examinados a simple vista o por medio de una lupa, y constituyen la fracción muy gruesa y la fracción gruesa de los suelos.

Los granos comprendidos entre 0.06 milímetros y 2 micrones pueden ser

examinados con la ayuda del microscopio y constituyen la fracción fina de los suelos.

Los granos menores de 2 micrones constituyen la fracción muy fina. De éstos, los comprendidos entre dos micrones y 0.1 micrón pueden ser distinguidos con el microscopio, aunque no se llegue a percibir su forma. Para los granos menores de un micrón ésta puede ser determinada con el microscopio electrónico, e investigada su estructura molecular por medio de los rayos X.

El proceso de separar un agregado de suelo en sus diferentes fracciones, cada una consistente en granos de tamaños distintos, dentro de ciertos límites, se conoce con el nombre de análisis mecánico o análisis granulométrico. Por medio del análisis granulométrico se ha encontrado que la mayoría de los suelos naturales contienen granos de dos o más fracciones. Las características particulares de un suelo compuesto están casi enteramente determinadas por las propiedades de la fracción más fina. En este aspecto, los suelos son similares al hormigón, cuyas propiedades están determinadas principalmente por el cemento, mientras que el agregado, que constituye su mayor parte, actúa como inerte. El "agregado" o parte inerte de un suelo compuesto forma entre el 80 y el 90 por ciento de su peso seco total, y la parte decisiva o activa el resto.

Las fracciones muy gruesas, por ejemplo la grava, consisten en fragmentos de rocas compuestos de uno o más minerales. Los fragmentos pueden ser angulares, redondeados o chatos. Pueden ser sanos o mostrar signos de considerable descomposición, ser resistentes o deleznables.

Las fracciones gruesas, representadas por las arenas, consisten en granos compuestos por lo general de cuarzo. Los granos pueden ser angulares o redondeados. Algunas arenas contienen un porcentaje importante de escamas de mica, que las hace muy elásticas o esponjosas.

En las fracciones finas y muy finas cada grano está constituido generalmente de un solo mineral. Las partículas pueden ser angulares, en forma de escamas y ocasionalmente con forma tubular, pero nunca redondeadas. En algunos casos excepcionales, la fracción fina contiene un alto porcentaje de fósiles porosos, como diatomeas o radiolarias, que imparten al suelo propiedades mecánicas poco comunes. En general, el porcentaje de partículas escamosas aumenta en un suelo dado a medida que decrece el tamaño de sus fracciones.

Si el tamaño de la mayoría de los granos de un agregado de partículas de suelo está comprendido dentro de los límites dados para una de las fracciones, el agregado constituye un suelo uniforme. Los suelos uniformes de granos muy gruesos y gruesos son comunes, pero muy raramente se encuentran suelos muy finos o coloidales de este tipo. Todas las arcillas contienen elementos finos, muy finos y coloidales y a veces hasta partículas gruesas. Las fracciones más finas de las arcillas consisten principalmente en partículas con forma de escamas.

El predominio de partículas escamosas en la fracción muy fina de los suelos naturales es una consecuencia de los procesos geológicos de su formación. La gran mayoría de los suelos deriva de procesos químicos que se deben a la acción de los agentes climáticos sobre las rocas, las que están constituidas, en parte, de elementos

químicamente muy estables y, en parte, de minerales menos estables en una masa friable de partículas muy pequeñas de minerales secundarios que, comúnmente, tienen forma de escamas, mientras que los minerales estables permanecen prácticamente inalterados. Es así como el proceso de descomposición de los agentes climáticos reduce las rocas a un agregado consistente en fragmentos de minerales inalterados o prácticamente inalterados, embebidos en una matriz compuesta principalmente de partículas con forma de escama. Durante el transporte por agua que sigue este fenómeno, el agregado es desmenuzado y sus elementos, sujetos a impactos y al desgaste.

El proceso puramente mecánico de desgaste no alcanza a reducir los granos duros y equidimensionales de minerales inalterados en fragmentos menores de unos 10 micrones (0.01 milímetro). En contraposición, las partículas friables, constituidas por minerales secundarios con forma de escamas, aunque inicialmente muy pequeñas, son fácilmente desgastadas y desmenuzadas en partículas aun menores. Esto explica por qué las fracciones muy finas de los suelos naturales se componen principalmente de tal clase de partículas.

Forma de las partículas

El tamaño de una partícula sólo puede expresarse por un número único cuando la partícula es regular, es decir de forma cúbica o esférica. Este caso no queda muy lejos de la realidad cuando nos referimos a partículas de suelos del tamaño de los limos o más gruesos, pero es totalmente inaplicable para partículas arcillosas. Esto se aprecia en las figuras 3.1 y 3.2, donde aparecen partículas de arena, y en la figura 3.3 que muestra partículas de arcilla. Las partículas laminares, como las de mica, pueden presentarse con tamaños de limo o aún mayores, mientras que en las fracciones arcillosas las partículas tienen formas como las de las figuras 3.1 y 3.2. Sin embargo, en general, la mayoría de las partículas del tamaño del limo o fracciones más gruesas suelen ser de formas bastante regulares mientras que las de la fracción arcillosa tienen dimensiones muy diferentes. La forma más común de las partículas arcillosas es la de laminilla aplanada, como se aprecia en las partículas de caolinita e ilita que aparecen en la figura 3.3. Sin embargo también se encuentran partículas cilíndricas y prismáticas en los suelos, generalmente en la fracción arcillosa.

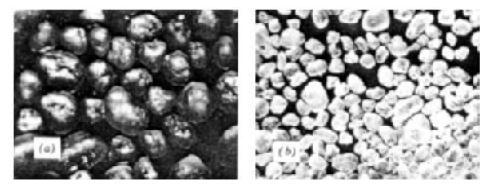
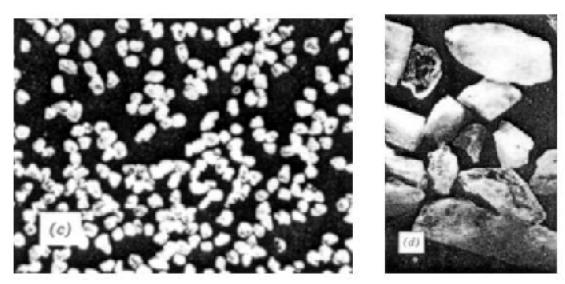
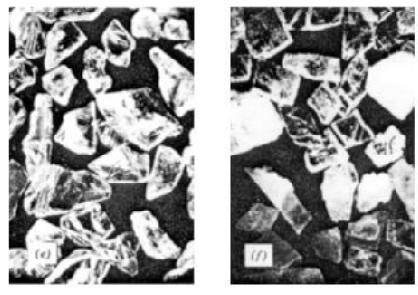


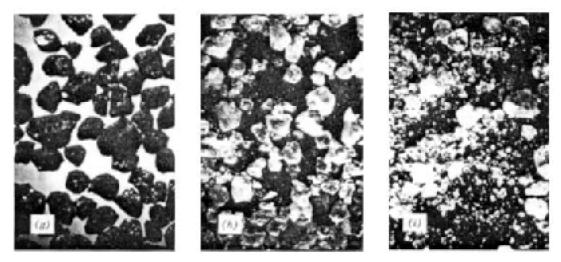
FIGURA 3.1. Partículas de arena. a) Arena de Otawa, 0.42 a 0.84 mm. b) Arena de Otawa, 0.19 a 0.42 mm.



c) Arena de Otawa, 0.11 a 0.19 mm. d) Cristales de feldespato, 0.19 a 0.42 mm.



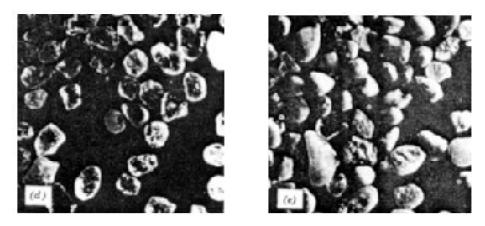
e) Cristales de cuarzo, 0.19 a 0.42 mm. f) Cristales de dolomita, 0.19 a 0.42 mm.



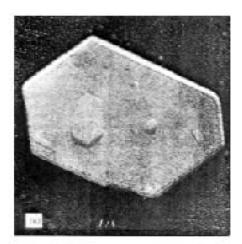
g) Arena de playa de Hawai. h) Arena de Venezuela. i) Arena de Venezuela (arena h comprimida bajo 1.400 kg/cm2) (Según Roberts, 1964.)



FIGURA 3.2. Arenas de Libia (fracción de 0.15 a 0.25 mm). a) Terreno de una factoría, Brega. b) Fondo del puerto, Brega. c) Planta de gas natural.



d) Raguba. e) Recinto de depósitos de crudo. Brega.



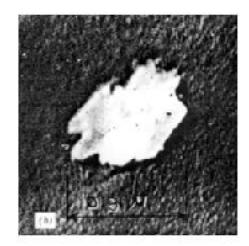


FIGURA 3.3. Partículas de arcilla. a) Caolinita (Lambe, 1951). b) Ilita.

Redondez, Textura superficial y color

El grado de redondez hace referencia a la agudeza de los bordes y cantos de una partícula. La figura 3.4 señala 5 grados de redondez.

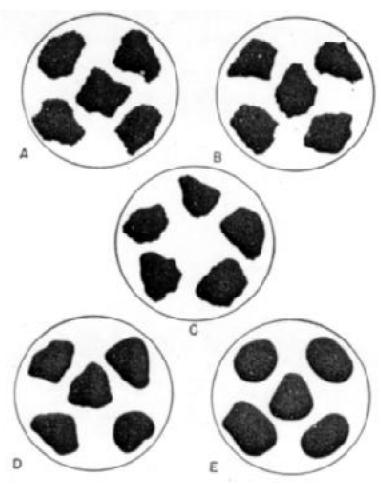


FIGURA 3.4. Grados de redondez de las partículas; (ejemplos de las distintas clases de redondez. A, angulosa; B, subangulosa; C, subredondeada; E, muy redondeada).

Las características secundarias de la superficie de una partícula independientemente del tamaño, forma o grado de redondez, se denominan "textura superficial" de la partícula. Para describir esta textura se utilizan términos como pulimentada, lisa, rugosa, estriada, mate, etc.

El color es una característica muy útil para el geólogo que trabaja en minería, aunque es de escaso valor para el ingeniero de suelos. Sin embargo, éste utiliza frecuentemente el color para describir un conjunto de partículas, por ejemplo la arcilla azul de Boston. Las descripciones de colores deben utilizarse con cuidado ya que el color de una masa de suelo puede variar con la humedad o con la composición química.

Las partículas de suelo de las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 ilustran varias características morfológicas. Los granos de arena de Ottawa y Raguba son redondeados y de aspecto mate. Las partículas de arena formadas por trituración de grandes bloques de roca (figura 3.1d, e y f), tienen cantos vivos y esquinas, y sus superficies no están estriadas, rayadas o sin brillo. En las fotografías de la arena de Venezuela puede advertirse que la compresión bajo elevadas presiones puede causar una degradación considerable de las partículas. La arena natural de Venezuela (figura 3.1h) tenía un 4% de partículas inferiores a 0.074 mm mientras que, después de someterla a compresión (figura 3.1i), el porcentaje de partículas menores de 0.074 mm era del 20%.

Todas las arenas de Libia de la figura, excepto la arena de Raguba, son de localidades próximas al mar Mediterráneo y contienen un 70 a 90% de carbonatos. La arena de Raguba procede del desierto, a 160 km de distancia del mar, y se compone de cuarzo en un 98%. Las arenas de base carbonatada, especialmente las de la figura 3.2a, presentan un elevado grado de agregación (es decir, cementación de las partículas), puede advertirse. Esta cementación influye inevitablemente comportamiento del suelo. Por ejemplo, las pruebas realizadas sobre las muestras inalteradas arena presentan una clara variación del comportamiento esfuerzo-deformación con el tiempo. Sin embargo, las pruebas realizadas sobre muestras reconstituidas en las que se había destruido la cementación mostraron una dependencia del tiempo mucho menor.

La partícula de caolinita de la figura 3.3 tiene una longitud de aproximadamente 1 μ y 0.08 μ de espesor. Pueden verse otras partículas más pequeñas de caolinita encima de la grande. La superficie de la partícula de caolinita aparece lisa a una escala de probablemente 100 Å. Las partículas más pequeñas de arcilla (montmorilonita) pueden existir, y de hecho existen normalmente, en laminillas de solamente 10 Å de espesor, siendo lisas en la extensión de un ángstrom.

1.2.- COMPOSICIÓN DE UNA PARTÍCULA DE SUELO

La naturaleza y disposición de los átomos en una partícula de suelo, es decir su composición, tiene una considerable influencia sobre la permeabilidad, resistencia y transmisión de esfuerzos en los suelos, especialmente en los de grano fino. Existen ciertos minerales que pueden conferir propiedades no usuales al suelo que los contiene. Ejemplos de ellos son la montmorilonita y la haloisita. La montmorilonita puede hacer que un suelo sea muy expansivo, mientras que la haloisita puede dar lugar a que un suelo tenga un peso especifico muy bajo.

Una partícula de suelo puede ser orgánica o inorgánica: Se conoce muy poco sobre la composición de los suelos orgánicos; de hecho, en el presente estado de conocimientos, el ingeniero no suele preocuparse de identificar los compuestos orgánicos reales de un suelo. Existen suelos formados totalmente por partículas orgánicas, como la turba o el muskeg, mientras que hay suelos que contienen algunas partículas orgánicas y algunas inorgánicas, como el "limo orgánico".

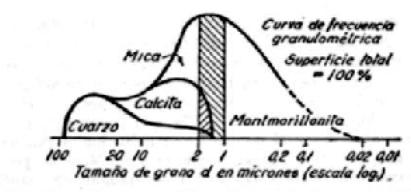
Una partícula de suelo inorgánico puede ser un mineral o una roca. Un mineral es un elemento o compuesto químico presente en la naturaleza y formado por un proceso geológico (es decir, tiene una composición química expresable mediante una fórmula). Una roca es el material sólido que constituye la corteza exterior de la tierra y está formada por uno o más minerales o cristales.

2.- CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Importancia práctica de la clasificación de los suelos

Desde el instante mismo en que las propiedades físicas de los suelos se tornaron en un motivo de interés, se ha querido, con frecuencia, correlacionar los resultados de simples ensayos de clasificación con las constantes del suelo necesarias para resolver los problemas de la práctica. La mayoría de estas correlaciones se remiten a las características granulométricas. No obstante, los intentos para fundamentar sistemas de clasificación exclusivamente jamás han conducido a resultados satisfactorios. Así, por ejemplo, las tentativas efectuadas para determinar el coeficiente de permeabilidad de los suelos partiendo de los resultados del análisis mecánico han fracasado porque la permeabilidad depende, en gran parte, de la forma de los granos, la cual puede ser muy diferente aun para suelos que tengan granulometrías idénticas. Además, es generalmente más económico y más exacto realizar un ensayo de permeabilidad que efectuar un análisis mecánico.

Asimismo, se ha sostenido que la fricción interna de las arenas bien graduadas compactadas es mayor que la que corresponde a arenas uniformes en la misma condición. Si bien hay evidencias prácticas, por determinaciones efectuadas in situ, que indican que esta aseveración quizá sea correcta, hay que recordar que el ángulo de fricción interna de una arena depende no solo de las características granulométricas sino también de la forma de los granos y de la rugosidad de sus superficies. Así, por ejemplo, los ángulos de fricción interna de dos arenas de granulometrías idénticas pueden ser muy diferentes. La verdad es que hasta el presente no se ha obtenido ninguna relación bien definida entre granulometría y ángulo de fricción interna. Los ensayos ejecutados para correlacionar las características granulométricas de los suelos finos, como los limos y las arcillas, con la fricción interna, han sido aún menos felices. La causa de estos fracasos viene ilustrada en la figura 3.5.



Granulometría y composición mineralógica de una arcilla glaciar marina

FIGURA 3.5

La curva gruesa superior de la figura 3.5 representa lo que se conoce como la curva de frecuencia granulométrica de las arcillas glaciares del sudeste de Canadá, dibujada sobre abscisas que representan los logaritmos del tamaño de los granos. El área de la faja rayada situada entre dos tamaños cualesquiera, por ejemplo 2 micrones y 1 micrón, representa el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre esos dos tamaños que existen en el peso total de arcilla seca. El diagrama indica que la fracción macroscópica (mayor de 0.06 milímetros) se compone esencialmente de cuarzo, como ocurre en la mayoría de las arcillas. La fracción microscópica (0.06 a 0.002 milímetros) consta en parte de cuarzo y calcita, y en parte de escamas de mica. El contenido de mica de esta fracción es muy diferente para las distintas arcillas y tiene influencia decisiva sobre la compresibilidad y otras propiedades del material. En el caso en consideración, la fracción coloidal (menor de 0.002 milímetros) se compone casi exclusivamente de montmorilonita, pero en otras arcillas puede estar formada de caolinitas o ilitas o mezclas de éstas. Como las propiedades físicas de una arcilla dependen en gran parte del tipo de mineral arcilloso que predomina en la fracción coloidal y de las sustancias presentes en sus capas de absorción, se ve que dos arcillas granulométricamente idénticas pueden ser muy distintas en otros aspectos.

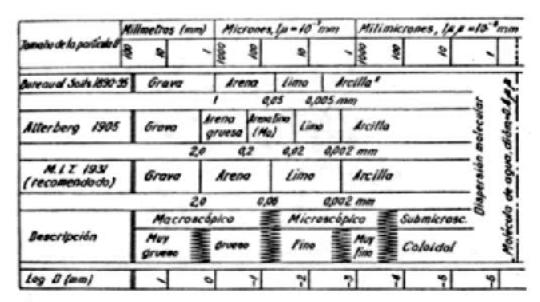
A causa de estas circunstancias, solo en el caso de suelos de una misma categoría y del mismo origen geológico – por ejemplo, todas las arcillas y todas las arenas ubicadas en zonas limitadas -, se han podido establecer relaciones estadísticas bien definidas entre la granulometría y las propiedades físicas de los suelos, como su fricción interna. En tales regiones la granulometría puede ser y es utilizada como elemento de juicio para apreciar las propiedades significativas de los suelos, pero su extensión fuera de los límites indicados no es aconsejable, pues se corre el riesgo de cometer errores importantes.

Como las propiedades de los suelos de granos finos se pueden relacionar de una manera general con su plasticidad, es preferible fundamentar su clasificación en los límites de Atterberg que hacerlo en función de la granulometría. La clasificación de los suelos mixtos que contienen tanto fracciones gruesas como finas debe basarse no solo

en las características granulométricas de la fracción gruesa sino también en la plasticidad de las fracciones finas y muy finas.

Clasificación basada en la granulometría

A pesar de sus limitaciones, las clasificaciones de suelos basadas en las características granulométricas tienen amplio uso, especialmente para descripciones generales o preliminares. En estos tipos de clasificaciones se acostumbra asignarles nombres de suelos, tal como "limo" o "arcilla", a las diferentes fracciones granulométricas. Las convenciones más ampliamente aceptadas se muestran en forma grafica en la figura 3.6.



El limite superior del tamaño de arcilla se cambio en 1935 de 0.005 mm a 0.002 mm. FIGURA 3.6. Clasificación de suelos basada en la granulometría.

En muchos casos, los informes con respecto a la calidad del suelo y a su comportamiento no incluyen más que el análisis granulométrico de la fracción gruesa y el porcentaje del total que pasa el tamiz N° 200, que abarca todas las partículas menores de 0.074 milímetros.

Todo sistema de clasificación basado solamente en la granulometría puede conducir a errores, pues las propiedades físicas de la fracción más fina de los suelos dependen de otros factores ajenos al tamaño de los granos. Por ejemplo, en función de cualquiera de las convenciones comúnmente aceptadas que indica la figura 3.6, un suelo formado de granos de cuarzo de tamaño coloidal debería ser clasificado como arcilla, cuando en realidad no tiene el más remoto parecido con dicho material. Por eso si los términos "limo" o "arcilla" son utilizados para indicar tamaños de partículas deben ir acompañados de la palabra "tamaño" en expresiones tales como "partículas de tamaño de arcilla". Además, como las clasificaciones granulométricas no han sido aún normalizadas, dichas expresiones deben ir acompañadas de valores numéricos que indiquen los límites del tamaño de las partículas que abarcan.

Salvo pocas expresiones, los suelos naturales consisten en una mezcla de dos o

más fracciones granulométricas, de modo que, en función de su granulometría, un suelo natural puede identificarse con los nombres de sus componentes principales, tales como "arcilla limosa" o "limo arenoso", o bien se le puede asignar un símbolo que lo identifique con una de varias mezclas normales de las distintas fracciones granulométricas.



FIGURA 3.7. Gráfico del Public Roads para la clasificación de suelos.

La identificación de los suelos por medio de los nombres de sus elementos principales se simplifica con el uso de diagramas, como el adoptado por el Bureau of Public Roads, figura 3.7, en el cual cada uno de los tres ejes coordenados sirve para representar una de las tres fracciones granulométricas: arena, limo y arcilla. El diagrama está dividido en zonas y a cada zona se le asigna un nombre. Las tres coordenadas de un punto representan los porcentajes de las tres fracciones presentes en un suelo cualquiera y determinan la zona a la cual pertenece. Por ejemplo un suelo mixto compuesto de 20 por ciento de arena, 30 por ciento de limo y 50 por ciento de arcilla, viene representado por el punto S y es clasificado como arcilla.

La identificación de un suelo dado, por comparación con mezclas normales, puede efectuarse rápidamente por medio de curvas granulométricas tipo dibujadas en papel transparente en un gráfico tipo. En dicho gráfico, cada curva granulométrica lleva un símbolo de identificación. Para clasificar un suelo real, se coloca el grafico tipo sobre el papel en que ha sido dibujada la curva granulométrica y se le da al suelo el símbolo que la curva tipo que más se parece al mismo.

Sistema unificado de clasificación de suelos.

La naturaleza poco satisfactoria de la mayoría de los sistemas de clasificación condujo a una revisión crítica del problema (A. Casagrande, 1948) y a la proposición del

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el que fue adoptado por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos, por el U.S. Bureau of Reclamation y subsecuentemente por muchas otras organizaciones de aquel país y del resto del mundo (U.S.B.R., 1963).

Según este sistema, los suelos se dividen en tres grupos principales: de grano grueso, de grano fino y altamente orgánico (suelos-turbas).

Los suelos-turba se reconocen fácilmente por sus características. Para separar los suelos de granos gruesos de los de granos finos se adopta el tamiz N° 200 (0.074 mm). En el terreno, la separación se realiza observando si las partículas individuales pueden o no ser distinguidas a simple vista. Si se juzga que más del 50% en peso del suelo consiste en granos que puedan distinguirse separadamente, aquél se considera de grano grueso.

Los suelos de granos gruesos se dividen en gravas (G) y arenas (S) según tengan más o menos del 50% de granos visibles retenidos en el tamiz N° 4 (mayores de 1 mm). A su vez, cada uno de estos tipos de suelos se divide en cuatro grupos:

- **W:** Bien graduados (coeficiente de uniformidad U > 4); limpios (< 5% que pasa el tamiz 200: partículas menores de 0.074 mm).
- **P:** Pobremente graduados (con granulometría discontinua, o U < 4 para gravas ó 6 para arena); limpios (< 5% de partículas menores de 0.074 mm).
- C: Bien graduados; sucios (> 12% de partículas menores de 0.074 mm); finos arcillosos o plásticos ($I\omega$ > 7, ubicado por encima de la línea A en el gráfico de las plasticidades).
- **F:** pobremente graduados: sucios (> 12% de partículas menores de 0.074 mm); finos limosos o no plásticos ($I\omega$ < 4, ubicado por debajo de la línea A en el gráfico de las plasticidades).

Según su composición, estos tipos de suelos se representan con símbolos como GW y SP. Para los materiales límites se utilizan símbolos dobles, como GW-GP.

Los suelos de granos finos se dividen en tres grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicos (O). Cada uno de ellos se subdivide a su vez en los que tienen límites líquidos menor de 50% (L) o mayor de 50% (H).

La distinción entre las arcillas inorgánicas C, los limos inorgánicos M y los suelos orgánicos O se realiza con el gráfico de las plasticidades modificado (figura 3.8). Los suelos CH y CL se representan por puntos situados encima de la línea A, mientras que a los suelos OH, OL y MH les corresponden puntos por debajo de ésta. En cuanto a los suelos ML, exceptuando algunas pocas arenas finas arcillosas, también vienen representados por puntos situados debajo de la línea A.

Los suelos orgánicos O se distinguen de los inorgánicos M y C por su olor característico y su color oscuro o, en casos dudosos, por la influencia que el secado a estufa ejerce sobre el límite líquido.

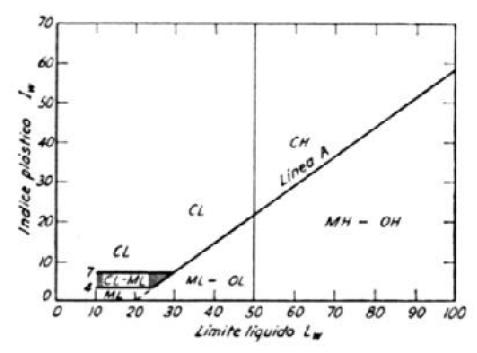


FIGURA 3.8. Gráfico modificado de la plasticidad, adaptado para ser utilizado con la clasificación unificada de suelos. Los suelos que se ubican en la zona sombreada se consideran suelos límites y se identifican usando dos símbolos (según U.S. Bureau of Reclamation, 1963).

En el terreno, los suelos de granos finos se pueden diferenciar por su resistencia seca, por su reacción ante un ensayo de sacudimiento o por su rigidez cuando la humedad está cerca del límite plástico. Las características pertinentes se indican en la tabla 3.1. Los materiales limítrofes se representan con un símbolo doble, como CL-ML.

El sistema unificado permite una clasificación digna de confianza sobre la base de algunos ensayos de laboratorio poco costosos. Con experiencia, también provee una base práctica para la clasificación visual en el terreno. Como todos los procedimientos basados en la granulometría o en las propiedades de los suelos amasados, no alcanza a tomar en consideración las características de los materiales intactos como se presentan en la naturaleza. Por ello en la descripción de las propiedades ingenieriles de las masas o depósitos de suelos solo puede servir como punto de partida.

TABLA 3.1. Clasificación de suelos de granos finos. Sistema de clasificación unificado.

Grupo	Resistencia seca	Reacción al ensayo de sacudimiento	Rigidez en el límite plástico
ML	ninguna o muy baja	rapida a lenta	nula
CL	mediana a alta	nula o muy lenta	mediana
OL	muy baja a mediana	ler ta	pecueña
MH	muy baja a mediana	lenta a nula	pecueña a meciana
СН	alta a muy alta	riula	alta
он	mediana a alta	nula a muy lenta	pecueña a mediana

TABLA 3.1. Clasificación de suelos de granos finos. Sistema de clasificación unificado.

CAPITULO IV. IDENTIFICACIÓN Y RELACIÓN DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1.- IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.

Debe distinguirse entre los suelos que tienen la facultad de expandirse y los que realmente presentan características expansivas en el campo. Los suelos que tienen pocas facultades o ninguna para expandirse, no lo harán en ninguna circunstancia. Por otra parte, los suelos con elevada capacidad para expandirse pueden o no expandirse; su comportamiento depende de la condición física del material al principio de la construcción, y de los cambios de esfuerzo y humedad a los que se les sujete.

El término suelos expansivos, implica no solamente la tendencia a aumentar de volumen cuando aumenta el contenido de agua, sino también la disminución de volumen o contracción si el agua se pierde, pero debe tenerse presente que la contracción es simplemente el proceso inverso.

De una manera general, el potencial expansivo de un suelo se relaciona con su índice de plasticidad. En la tabla 4.1. se indican varios grados de capacidad expansiva y

los intervalos correspondientes del índice de plasticidad.

TABLA 4.1. Relación entre el potencial de expansión del suelo y el índice de plasticidad.

Potencial de Expansión	Índice de Plasticidad
Баjo	0 15
Medo	10 - 35
Alto	20 - 55
Muy Alto	35 ó más

TABLA 4.1. Relación entre el potencial de expansión del suelo y el índice de plasticidad.

El hecho de que un suelo con elevado potencial de expansión, se expanda en la realidad depende de varios factores. El de mayor importancia es la diferencia entre la humedad de campo en el momento de la construcción y la humedad de equilibrio que se alcanzará finalmente con la estructura terminada. Si la humedad de equilibrio es considerablemente mayor que la humedad de campo, y si el suelo tiene una elevada capacidad de expansión, puede ocurrir esta en alto grado, evidenciada por el levantamiento del suelo o la estructura, o por el desarrollo de grandes presiones de expansión. Si la humedad de equilibrio es más baja que la humedad de campo, el suelo no se expandirá, sino, por el contrario, se contraerá. Un segundo factor es el grado de compactación del suelo, si está en un terraplén, o el grado de preconsolidación, si es un material natural inalterado. Una compactación relativamente elevada o una presión previa por sobrecarga, favorecen la expansión cuando puede aumentar el contenido de agua. Un tercer factor es el esfuerzo al que el material quedará sujeto, después de que la construcción se termine. Cuanto mayor sea la carga aplicada, mayor será la expansión.

La influencia de éstos y de varios otros factores, introduce grandes incertidumbres en la predicción del comportamiento de los suelos en lo referente a expansión, en una obra dada. La experiencia laboral es la mejor guía. Las pruebas de expansión realizadas en condiciones que simulen lo mejor posible las condiciones previstas, pueden proporcionar también útiles informaciones.

Pruebas de Expansión.

Cuando sea posible obtener pares prácticamente idénticos de muestras inalteradas con la humedad que se espera que prevalezca cuando se emprenda la construcción, las estimaciones más seguras del aumento de volumen debido a la expansión pueden obtenerse con la prueba doble en el consolidómetro (figura 4.1.). La seguridad de las predicciones basadas en la prueba depende, sin embargo, no solamente del grado en el cual la humedad inicial de las muestras concuerde con la humedad real al principio de la construcción, sino también del grado en el que la humedad final o de equilibrio en el campo, concuerde con la alcanzada por el espécimen, al que el agua tiene libre acceso.

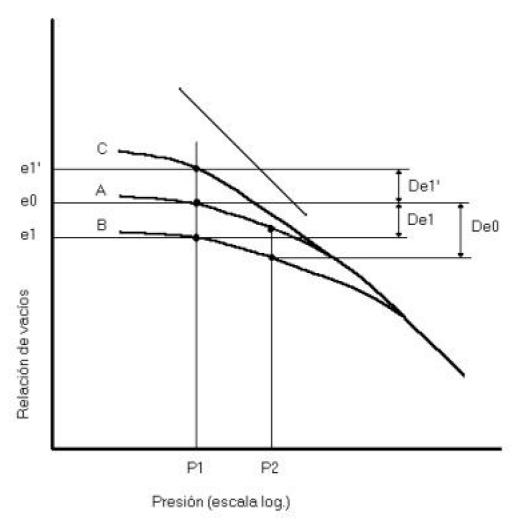


FIGURA 4.1. Comportamiento del suelo en pruebas de consolidación dobles. a) Relación entre la oquedad y la presión total en probetas a las que no se les añade agua. b) Relación con una muestra idéntica en la que se da acceso al agua y que sufre colapso. c) Igual que b, para muestra expansiva.

Las dificultades prácticas para obtener muestras idénticas para la prueba doble de consolidación han sido la causa de que se usen pruebas más sencillas, que dan resultados que pueden interpretarse más bien cualitativamente que cuantitativamente. Dos tipos de pruebas se conocen comúnmente como pruebas de expansión libre y pruebas de presión de expansión.

En las del primer tipo, se coloca una muestra en el anillo de consolidación tan ajustadamente como sea posible y con el contenido de agua que se prevé para el suelo en el momento de la construcción; esa muestra se sujeta a una pequeña presión vertical, del orden de 701 gr. por cm2. Las piedras porosas que se colocan arriba y debajo de la muestra deben haberse secado al aire al iniciar la prueba. Después se permite el paso del agua a la muestra a través de esas piedras y se mide su expansión vertical como función del tiempo, hasta que prácticamente cesa. El aumento de espesor, expresado como porcentaje del espesor original, se designa como expansión y es la medida del

máximo porcentaje de aumento en volumen, que puede esperarse que experimente el material como consecuencia de su contenido de agua. un cambio de volumen menor que 1.5 por ciento se considera bajo; entre 1.5 y 5 por ciento, medio; entre 5 y 25 por ciento, alto y superior a 25 por ciento, muy alto.

TABLA 4.2. Relación entre el grado de expansión del suelo y el porcentaje de cambio de volumen.

Grado deExpansión	Cambio de Volumen (%)		
Зајр	0-15		
Medio	1.5 ā		
Alto	5 - 25		
Muy Alto	2t ò más		

TABLA 4.2. Relación entre el grado de expansión del suelo y el porcentaje de cambio de volumen.

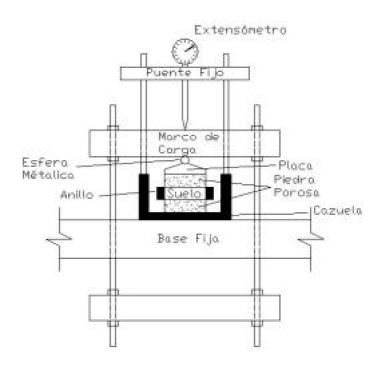


FIGURA 4.2. Detalle de la colocación de la muestra en el consolidómetro de anillo flotante.

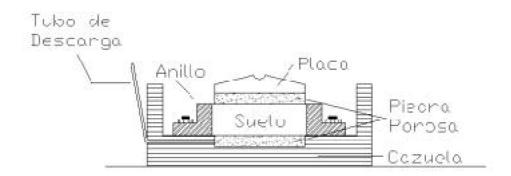


FIGURA 4.3. Detalle de la colocación de la muestra en el consolidómetro de anillo fijo.

La prueba de presión de expansión se efectúa con un equipo semejante, pero impidiendo la expansión vertical al humedecerse la muestra. La fuerza necesaria para impedir la expansión se determina como función del tiempo. La presión de expansión que se obtenga al final es la medida de la fuerza máxima por unidad de área que pueda producir el suelo en las condiciones de expansión extrema. Las presiones de expansión inferiores a 2 ton/m2 se consideran bajas; presiones superiores a 200 ton/m2 se encuentran ocasionalmente.

Los dos tipos de pruebas de expansión proporcionan indicadores útiles sobre el comportamiento extremo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, la expansión está parcialmente reprimida. En consecuencia, las magnitudes de la expansión y de sus presiones, probablemente sean en realidad intermedias entre las determinadas con las dos pruebas. Además, los resultados de los dos tipos de pruebas no siempre son consistentes, en parte debido a la inevitable variación de propiedades entre las muestras. Si las dos pruebas indican un elevado grado de expansión, el suelo debe considerarse sospechoso. Si los resultados de ambas pruebas indican un comportamiento muy expansivo, puede ser justificable tomar precauciones extremas.

Se puede obtener información cuantitativa útil de la variación de la presión de expansión que tenga lugar en una prueba en la que la muestra, de nuevo con el contenido de agua supuesto para el momento de la construcción, se sujete a una presión vertical arbitrariamente elegida, y se deje llegar al equilibrio antes de permitir acceso de agua a ella. La presión que se toma usualmente es el doble de la presión que se suponga que ha actuado en la probeta antes de extraerla del terreno, pero si se sospechan grandes tendencias a la expansión, puede ser conveniente usar una presión inicial más elevada. Luego, se introduce el agua y se observa el aumento de altura de la muestra hasta que se alcance el equilibrio. Luego se reduce la presión vertical aproximadamente a la mitad y se observa nuevamente la expansión. Se sigue el mismo procedimiento para una segunda reducción de presión, y finalmente, con una reducción de la presión vertical a cero. Se hace una gráfica con los resultados, como se muestra en la figura 4.4. la curva A representa un suelo que produce una elevada presión de expansión a expresiones pequeñas, pero en el que el aumento de volumen es pequeño; además, ejerce sólo una ligera presión después de una expansión moderada. La curva B representa a un suelo más indeseable, el que, aunque produce solamente una presión de expansión moderada, después de una expansión también moderada, se expande mucho cuando se reduce la presión. Los datos obtenidos con estas pruebas pueden usarse para estimar la magnitud de la sobrecarga o recubrimiento necesario, para evitar que el suelo que está a cierta profundidad se expanda o para limitar la expansión a una cantidad aceptable. También pueden usarse para estimar la elevación final de la superficie correspondiente a una profundidad dada de excavación o de relleno.

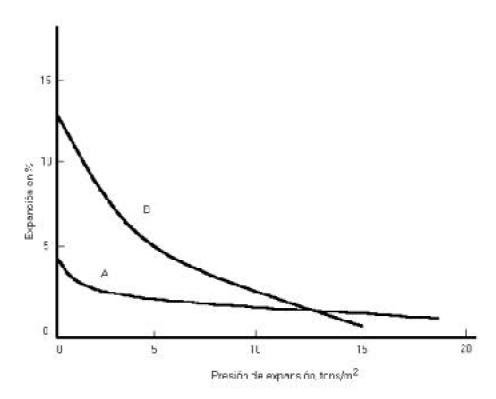


FIGURA 4.4. Resultados típicos de la prueba de presión de expansión modificada.

Los resultados de todas las pruebas de expansión son, si acaso, toscas aproximaciones, parcialmente debido a los cambios inevitables en la humedad y en la estructura de los suelos durante los sondeos, muestreo y manejo en el laboratorio. Por ejemplo, las muestras alteradas tomadas hincando un muestreador de paredes gruesas en el terreno, pueden ser más compactas que el suelo en el lugar y, en consecuencia, pueden expanderse más que el material sin alterar. Sin embargo, el mayor error que pueden tener las pruebas de expansión, probablemente provenga de la diferencia entre la humedad inicial de la muestra y la humedad en el campo, en el periodo inicial crítico de la construcción, después del cual, la expansión o la contracción será perjudicial a la estructura.

Por otra parte según el manual de carreteras en la sección 2.504.406 se habla de la expansividad, en el cual se agrega:

"Expansividad. Cada vez que se prevea que un suelo pueda ser de carácter expansivo y dicha característica pueda tener influencia a la o las estructuras por proyectar, deben realizarse ensayos de expansividad, los que se pueden efectuar ajustándose a la norma AASHTO T258. Un criterio que permite tener un primera idea de

la expansividad de un suelo se incluye en la tabla 2.504.406 A, que hace uso de los siguientes parámetros: Límite Iíquido (Lw), Índice de Plasticidad (IP) e Índice de Contracción (S.I. = Límite Líquido – Límite de Contracción)".

TABLA 4.3. Grados de Expansividad según Manual de Carreteras Volumen Nº 2.

Grado de Expansividad	IP	S.I.	Lw
ក់គេ ០	< 17	< 15	20 - 36
Med o	12 - 23	15 - 30	35 - 50
Alic	25 - 32	30 - 60	50 - 70
Muy Alto	> 82	0.60	70 90
Extraordinarismente Alto	> 32	> 60	> 90

TABLA 4.3. Grados de Expansividad según Manual de Carreteras Volumen N° 2.

2.- ESTIMACIÓN DEL CAMBIO VOLUMÉTRICO PROBABLE

En muchos suelos con alto contenido arcilloso activo, los cambios de humedad originan alteraciones volumétricas, a veces bastantes severas. La pérdida de humedad del suelo produce contracciones criticas, y el humedecimiento, expansión o hinchamiento inadmisibles. Cualquier causa de variaciones sustanciales en el contenido de agua en estos suelos, puede generar movimientos excesivos y el posible daño de las estructuras soportadas por ellos.

El régimen climático de una región es una buena guía para identificar las condiciones del problema. Se pueden distinguir, en general, regiones áridas, regiones húmedas y regiones que tienen estaciones secas y húmedas bien definidas.

En las regiones áridas los suelos se encuentran normalmente secos en las zonas expuestas a la intemperie, debido a que las pérdidas por evaporación superficial son varias veces superiores al humedecimiento por lluvias. Además, el suelo debajo de las edificaciones queda protegido, contrariamente al suelo exterior aledaño. Cuando se construye un edificio, se inicia un proceso de aumento del contenido de humedad del suelo debajo de la construcción, con la siguiente expansión desigual en el nivel de soporte, que origina el deterioro gradual de dicha construcción. Otras causas de humedecimiento tales como tubos o drenajes rotos o aguas de irrigación producen efectos similares.

En regiones húmedas donde los suelos se encuentran permanentemente saturados, una fuerte desecación puede ocasionar la contracción de suelos susceptibles y el correspondiente asentamiento de las estructuras cimentadas sobre ellos.

En las regiones con estaciones secas y húmedas bien definidas, los suelos susceptibles se expanden y se contraen en ciclos más o menos regulares. Debajo del

centro de los edificios, los suelos encuentran la máxima protección y los menores cambios volumétricos; contrariamente, en la periferia los suelos la menor protección y ocurren los mayores cambios volumétricos. Como resultado, se presentan deformaciones repetidas e incrementales de las estructuras, que las conducen a un deterioro progresivo.

Ciertas condiciones locales asociadas a la función de una obra y originadas, por ejemplo, en el calor producido por calderas, hornos y calentadores industriales, con deficiente aislamiento térmico del terreno subyacente, pueden dar lugar a condiciones de desecación acelerada en suelos susceptibles, acompañada de asentamientos rápidos e irregulares.

Son frecuentes las oportunidades en las que la humedad extraída del terreno por las raíces de las plantas generan desecación acelerada del suelo. En ocasiones la recuperación hídrica de los suelos obtenida al eliminar cierta vegetación produce expansiones.

Las técnicas para determinar la susceptibilidad de un suelo a los cambios volumétricos, por variaciones de su contenido de humedad, requieren en cada caso investigación detallada y análisis profundo. Es necesario emplear la disciplina del estudio del comportamiento de los suelos, empíricamente vinculada a las condiciones locales. Son invaluables las experiencias de casos precedentes, relacionadas con el problema entre manos, mediante una caracterización idónea de los suelos.

Los suelos susceptibles pueden identificarse con ayuda del índice plástico y el limite de contracción, tal como se muestra en la tabla 4.4.

TABLA 4.4

Posibilidades de cambio	indice (Limite de	
volumétrico con los cambios - de humedad	Regiones Āridas	Regiones Lumedas	Contraction
Peguaña 💮 💮	0 - 15	0 - 30	< 2
≓ogueña a medorada	15 - 30	30 - 50	10 - 19
Moderada a fuerte	> 30	> 50	₹"Ū

Como en el caso de la compresibilidad, se ha encontrado que la expansibilidad depende del tipo de mineral de arcilla que la componga y que esa expansibilidad aumenta en el orden caolinita, ilita, montmorilonita. Los cationes de absorción juegan un papel muy importante en la expansibilidad (como en la compresibilidad). El Li⁺ y el Na son los cationes que producen la expansibilidad mayor, mientras que el Fe es el de los que producen expansibilidad menor.

En la práctica se ha adoptado como una medida relativa de la expansibilidad de una arcilla el incremento de volumen, expresado en porcentaje, del volumen total inicial de una muestra secada al aire y puesta a saturar en un consolidómetro estándar bajo una presión de 0.7 ton/m2 (1 lb/pulg2). El criterio cuantitativo anterior se ha correlacionado

con el contenido coloidal (porcentaje de partículas menores que 0.001 mm), el índice de plasticidad y el limite de contracción. Estos tres conceptos proporcionan una identificación adecuada para fines prácticos. La tabla 4.5 es la que propone W. G. Holtz, para la identificación de las arcillas expansivas.

TABLA 4.5. Datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansiv

Datos do l	Pruppas de Ido	ntricación	Expansión Propable:	
Contanica Coldida (%<0,001mm)	Índice de Plasticidad	imite da Contracción	Cambio Volumétrico en % (secola saturado)	Crado de Expansión
> 28	2.30	~ 11	> 30	Muy Alto
20-51	25 - 41	7 - 19	20 - 50	Alto
13 - 23	15 - 28	10 - 13	10 - 20	Medio
£15	< 18	¥ 15	< 10	Bajo

TABLA 4.5. Datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansivos.

3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS

De acuerdo a los objetivos planteados al comienzo, lo que se persigue es saber si se puede establecer una relación (para identificar la existencia de arcillas expansivas) entre los ensayos comúnmente realizados a las muestras de suelos de una obra, para lo cual utilizaremos los mismos informes entregados a la empresa que realizó la obra en Colina por el laboratorio "SOILTEST Ltda.", de Santiago, que les presto dichos servicios.

Cabe destacar que los informes realizados por el laboratorio son pobres en cantidad y variedad de ensayos, por lo cual el profesional debe tener la claridad necesaria para saber a ciencia cierta los ensayos específicos que se necesitan para conocer más a cerca del material con el que se esta trabajando.

Como se mencionó anteriormente los ensayos que se utilicen para análisis, serán los que presenten materiales relativamente finos, esto quiere decir arenas, limos o arcillas, para que posteriormente se determine su posible expansión. A continuación se adjunta una tabla en la cual se identifican cada uno de los informes, su fecha de entrega, la descripción de la muestra, el camino en el cual fue tomada y la fecha del muestreo.

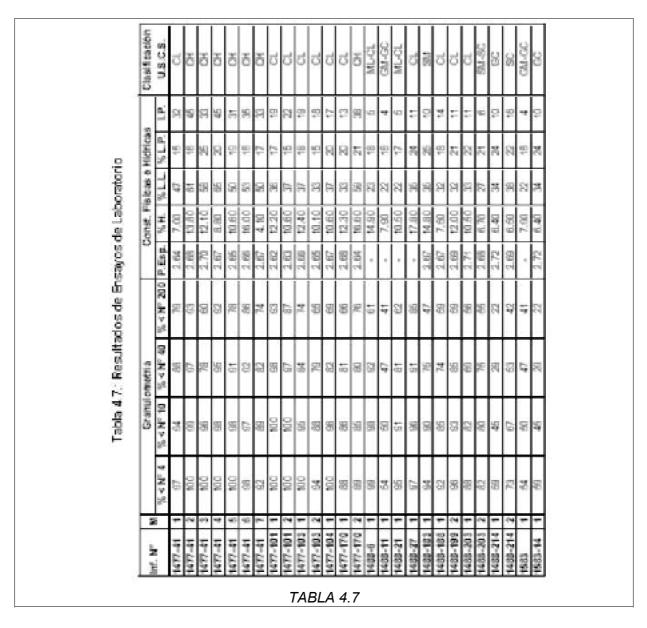
TABLA 4.6. Detalle de Informes de Laboratorio

2012012	Meastra	Fictions	Nuastratoriacean danseca	Cammo	F.B Das Lik
BANK .	. X	A KID	Calle votes therein	Arkin sarakati	. 199
1000		Mar I	La Caralle Robbie	a liqu	3.60
1000	>	Mar. I	La consta Poblik	in Kints	7.6
IBII		March	dello Andre Syrice E deu et	Ja Prijas Guru Vilano	
1471 IP	9	2 4 66	Gullo policy coduprays code	Lot Eposopia	5, 400
88.74 7 WT	- 2	Mar 1	Per e con de estrator		
8473-4 M	S	March Second	Europe ve reinzun	C Reu S Macu	- 33
8478-193 8478-193	- 1	May 01 May 01	Englische Addione Englische Addione	Local Chart	- 33
ERTA-1 BM		Maria Maria	Self come .	n for mod	-
BETA-TEL		5.000	Section 2.12	Pa 14 1	200
89 F4-92	100	3 40	Yello colos visconos, codo	4 1.32 J m/s	27 (125.00)
BATE IF	- 0	26.0	Gulla da bro documento de	Tiplica: Violence	26, 200
BEER 1711	100	Medit	C. To - Canced	A Pressure	
88.F4 37H	- 33	May III	(Cittle + 4 model)	H. Bales	460
14T8-15	9	265.0	iells Andre Sylic Allie Vices	in Price	26, 2000
1471-30	- 8	26.40	ialls Andre baltic Altical can	Lac Ericce Koria	26, 2400
84TB 254	- 35	2.101	Gally Ninds: 51	Tokak Sideside	465
BEFARE		Dett	Selle do caracia. La	in Moreov	DESCRIPTION
ST CAPUEL		N. 20 407	Yellow was and	- LAT	Shirthe
8477-287	Š	Nov-01	Salle a sequence	C LAn	26/6/6
ELTE J	- 8	5777	At the melon war recommends	will have	66,744
BETA BI		rise III	C. Barrako zon lagarrenda	Ar Krissis H. L.A.	
BETA BI	- 8	ALC: IT	10 Benefit von Gegennete	Arkansasii	
BETA-BI	-:-	ardf	Selection and to	n L. m.Y	196
14T1-11	1 1	56.0	i allo dio bec documento di	Los Escapos 2	
8478 41 8478 41	5	Sev O	Gullo politic cod, program de Gullo politic cod, program de	Da Price Sur Figure : Science	633
1472-11	1 1	2014	Palle a class contracts and the	processors and	192
1473-IR	- 2	20.00	Palle celes non degrande	W. M. ana DR. v	29,01,0
1111-12	- 3	26.40	Fall of the coordinate with the	Lot Mit anachors	25010
SETS SE	1 3 -	11	Callian also your areas some	Ar Mineson President	35011.17
12.74-8E	>	ar II	Selle effects with the	n 1 . m.2	27617411
ERFE-EN		eleff	Selle dorre une la	in Krown	250301
14T1 45		7,50	Gullon albertace, provente de	Los Guebrerou	26,01,0
14T1 4P	3	7,60	Gulla da beckess, araws code	positines to	8.707.0
HERA C	3	0.600	Calle to be and independent	- //-	0823400
8473-7		2000	Palle celes seu eren de	an Passaa.	147260
1446-11		2640	Fallego (ed.g., flewich):	Joseph Canada North	5 200
8448-144		7,6-0	Pac A Skrilder	: Ura	
EMILET REI	0 0	eler	Er Amales	Ke	- 20
8011101 MIL. 81410-1373	3	Mart I	Mello della Marral Mello de da Caraco A.Y., e da:	ANT AND	- 560
		M (44)		S Line	
1445 234 1446 234	-:-	52.0	Gullo Minda: En De A.C. in esp De Bonnesto Folko A.C. in espa	12 185	500
8828 PL	- ; -	25.10	Cally and a Kirmshir	APPEN	18/2011
Bullest #	1 1	8000	Sell and Track Street	147	3.2
1446-214	3	5a-01	iallo Andreba de los Alticas sac	Siller	2000
848B 2F		Sec O	English de	A7 E19:7	22,200
1448 28	- 2:	Sa. O	Gallo Ametro Salice Automicso	JAP 105	26.500
REQUESTS		-0147	Yello cirke, Criss A.Y., cica.	an Louis Karla	204122-00
84GD-55	X	See 4	Sello Nicke, Lance J. S., exact	av. Folia 7a	27/12/00
Map-c	- 0	Conf	Sells for day Service M. S. e. e.a.	C Carilla	15/12/00
BESK SI		Sec II	CORN MICCIA SE	a Hizmanii	100000
843X1E	-0-	No. 1	Calle a debri de III en Ada	Arthur system	197
BIAICH1	- 3	Mar I	Selected: Contact A Frield	4 F (1X)	- 960
1545-1	1	34m/01	ielo Ardo Sano Alfonte Gelo Ardo Sano Alfonte	Lan Entropy	
1806 J 1806 J	- 3	Mer CI	Gallo Ander Syrice Aufronder Gallo Ander Syrice Aufronder	Lot Gul Set : Lot Mit Encahore	- 00
8645-4	5	OWNER OF WARRIED	Salla Sanda, Carro John Carlo Palla Sanda, Carro John Carlo	Lock Carackets	. 12
EG0-3		Marci Marci	Pallo Sanda, Carro A. Frontia	Los Estados 1	137
1845-1	-	Olys Cl	iallo Andr: Sanc A. Fonta	Lo: Ercsor2	
INIH A		Mar I	Calle a rober de pro Al Longha	Arkaraval more	- 68
Blatche.	9	Mar I	Sell cools for a 2 km at e	er fuel a ma	- 32
BIAICHA	100	Mar i	Selectedo de la Fresta Selectedo de la Fresta	APT	
BBGB 4	18	dw Cl	Gallo Andre Syrice Alfred Control	AN GULHADAN ÓN	9.0
			Gello Andre Santo Alfrontia	30 E120	

TABLA 4.6. Detalle de Informes de Laboratorio

De acuerdo a la descripción realizada en la tabla 4.6, a continuación se entregan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos aplicados a las diferentes muestras tomadas en la obra. Como se mencionó anteriormente los ensayos realizados son pobres en cantidad, por lo que se podrá hacer sólo una identificación a través del Índice de Plasticidad y otra a través del Porcentaje de Hinchamiento (debido al cambio de Volumen), además se realizará una identificación utilizando ambos criterios en conjunto, para ello se han desarrollado las siguientes tablas.

TABLA 4.7



Continuación TABLA 4.7

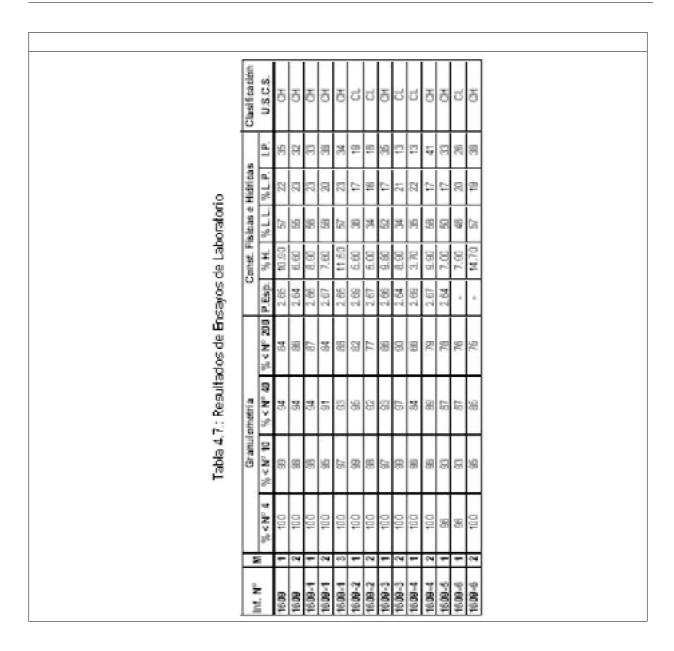


TABLA 4.8

		Granub	Granulowatria			Const. F	Pisicas a	a Hidricas		Challesolen	Misshon
7.N		% × N	95 N	% < N° 200	degra	# 9F	77%	d7%	11	US.C.S.	lento (%
8	-	8	58	89	2.60	12.00	75	23	11	10	200
100	_	8	98	Co.	2.67	7.80	83	51	574	III	0.20
35	_	80	92	47	2.87	14.80	35	93	D)	SM	0.60
100		8	35	界	2.67	8.10	30	8	- 04	73	1.80
8		98	92	29	2.86	16.60	88	88	8	TIM	1.90
8		86	98	139	16.7	0975	25	4.5	L	10-TM	0.60
9		100	Si	12	287	10.90	男	8	574	TIVI	0.90
8	1	88	23	F	2.80	14.20	SH	23	Q	づ	0000
8		88	Æ	18	2.86	16.10	A	81	=	ಶ	000
8	-	细	38	25	271	12.10	54	75	40	TW	230
100		铝	72	- 69	2.68	7.00	S	17	94	30	2.60
100	- 2.0	97	08	22	82.2	12.00	馬	22	94	70	3.10
8		周	SI	88	2.63	4.30	15	8	17	10	4.80
100		86	96	38	997	11.00	37	17	94	10	4.70
5		\$B	23	8	2.67	7.70	22	450	- 64	TO	6.80
8		56	75	73	2.06	11.30	30	47	94	70	2.00
8	П	63	60	Œ	2.60	7.60	30	43	74	39	1.10
800		90	96	果	587	14.90	33	- 64	75	70	1.30
6		8	22	69	280	7.60	- 01	21	8	Б	7.40
8	i	P	8	Q.	2.68	979	177	92	19	38	979
8	Ī	88	23	25	2.配	44.20	25	22	04	70	000
8		98	92	28	2.88	16.10	23	23	11	CL	000
8	П	66	25	2	274	13,70	8	58	- 44	70	380
88		71	85	80	2.64	6.20	33	22	11	38	0.70
88		0	35	50	2.67	12.70	- 29	99	42	5	9.60
×	ī	12	03	29	2.68	10.90	9	16	R	70	4,00

Para el primer análisis consideraremos la tabla 4.7, en la cual se entregan los resultados de granulometría y las constantes Físicas e Hídricas, para ello utilizaremos los resultados del índice de plasticidad de la tabla antes mencionada, los que relacionaremos con la tabla 4.1. del presente capitulo, con lo cual obtendremos el Potencial de Expansión que se expresa en la tabla 4.9.

En el segundo análisis consideraremos la tabla 4.8, la que nos entrega los resultados de granulometría, las constantes Físicas e Hídricas y el porcentaje de cambio de volumen (Hinchamiento), como en el caso anterior también utilizaremos una tabla de este capitulo, la numero 4.2. la que nos entrega los Grados de Expansión relacionados con los porcentajes de Cambio de Volumen, que se muestran en la tabla 4.10.

Para finalizar se ha realizado una tabla comparativa utilizando ambos criterios, para tener una identificación más cierta, con lo cual destacaremos las muestra en las cuales se pueda concluir el mismo Grado de Expansión para un mismo material. Para realizar este

análisis utilizaremos la tabla 4.8, pero a diferencia del análisis anterior, en éste relacionaremos tanto las constantes Físicas e Hídricas como los porcentajes de Cambio de Volumen, en una misma tabla (4.11.), que llevaremos a un gráfico en el que se distinguen los Grados de Expansión y las líneas generadas por la unión de los Índices de Plasticidad con los porcentajes de Cambio de Volumen, para una apreciación más clara, como lo muestra la figura 4.5.

TABLA 4.9. Análisis de Resultados de Ensayos de Laboratorio

	M	3	Sonet, F	161035-0	Hidrica	Potencial de	Clasificación	
Inf, N°	IM	P.Esp.	% H.	% L.L.	% L.P.	LP.	Expansión	U.S.C.S.
1477-41	1	2.64	7.00	47	15	32	Alto	CL
1477-41	2	2.68	13.80	61	16	45	Muy Alto	CH
1477-41	3	2.70	12.10	58	25	33	Alto	CH
1477-41	4	2.67	8.80	65	20	45	Muy Alto	CH
1477-41	.5	2.65	10.80	50	19	31	Alto	CH
1477-41	6	2.56	16.00	53	18	35	Atto	CH
1477-41	7	2.57	4.10	50	17	33	Alto	CH
1477-101	1	2.82	12.20	36	17	19	Medio	CL
1477-101	2	2.53	10.60	37	15	22	Alto	CL
1477-103	1	2.56	12.40	37	18	19	Medio	CL
1477-103	2	2.55	10.10	33	15	18	Medio	GL
1477-104	1	2.67	10.60	37	20	17	Medio	CL
1477-170	1	2.88	12.30	33	20	13	Medio	CL
1477-170	2	2.64	16.60	59	21	38	Muy Alto	CH
1488-6	1		14.90	23	18	.5	Bajo	ML/CL
1488-11	1		7.90	22	18	4	Bajo	GM-GC
1485-21	1		10.50	22	17	-5	Bajo	ML-CL
1488-27	1	- 14	17.80	35	24	11	Medio	CL
1488-183	1	2.67	14.80	35	25	10	Bajo	SM
1488-188	1	2.67	7.50	32	18	14	Medio	CL
1488-199	2	2.69	12.00	32	21	11	Medio	CL
1486-203	1	2.71	10.50	33	22	11	Medio	CL
1488-203	2	2.68	6.70	27	21	- 6	Bajo	SM-SC
1488-214	1	2.72	5.40	34	24	10	Bajo	GC
1488-214	2	2.69	6.50	38	22	16	Medio	80
1583	1	0.00	7.90	22	18	4	Bajo	GM-GC
1583-14	1	2.72	6.40	34	24	10	Bajo	GC
1509	1	2.65	10.90	57	22	35	Alto	CH
1609	2	2.64	6.60	5.5	23	32	Alto	CH
1609-1	1	2.86	8.90	56	23	33	Alto	CH
1509-1	2	2.87	7.60	58	20	38	Muy Alto	CH
1509-1	3	2.65	11.50	57	23	34	Alto	CH
1609-2	1	2.69	5.60	36	17	19	Medio	CL
1609-2	_	2.67	5.00	34	16	18	Medio	CL
	2	2.65	9.80	52	17	35	Alto	CH
1609-3	2	2.84	8.90	34	21	13	Medio	
	_	A CONTRACTOR OF THE PARTY OF TH	The second division in		A CONTRACTOR OF THE PARTY OF TH			CL
1609-4	1	2.89	3.70	35	22	13	Medio	CL.
1509-4	2	2.67	9.90	58	17	41	Muy Alto	CH
1609-5	1	2,64	7.00	50	17	33	Alto	CH
1609-6	1 2	-	7.90	46	19	26	Alto Muy Alto	CL

TABLA 4.10. Análisis de Resultados de Ensayos de Laboratorio

Inf. N°	М	Co	inst, Fi	sicas e	Hidricas		Clasificación	Hinchami	Grados de Expansión
HH. IV	IMI	P.Esp.	% H.	%LL	%LP.	LP.	U.S.C.S.	ento (%)	
1477-3	1	2.69	12.00	32	21	11	CL	2.00	Medio
1477-4	1	267	7.90	23	21	2	ML	0.20	Bajo
1477-5	1	2.67	14.80	35	25	10	SM	0.60	Bajo
1477-7	1	2.67	8.10	30	20	10	CL	1.80	Medio
1477-10	1	2.69	16.60	38	29	9	ML	1.90	Medio
1477-15	1	2.71	9.60	24	17	7	ML-CL	0.60	Bajo
1477-17	1	2.67	10.90	26	24	2	ML	0.90	Bajo
1477-19	1	2.69	14.20	32	22	10	CL	0.00	Bajo
1477-20	1	2.66	15.10	33	22	11	CL	0.00	Bajo
1477-42	1	2.71	12.10	32	24	8	ML	2.30	Medio
1477-42	2	2.68	7.00	32	17	15	SC	2.50	Medio
1477-44	1	2.73	12.00	38	22	16	CL	3.10	Medic
1477-44	2	2.63	4.30	41	20	21	CL	4.80	Medic
1477-45	1	2.65	11.00	37	21	16	CL	4.70	Medic
1477-45	2	2.67	7.70	37	18	19	CŁ	5.80	Alto
1477-49	1	2.65	11.30	33	17	16	CL	2.00	Medic
1477-143	1	2.69	7.50	29	17	12	GC	1.10	Bajo
1477-254	1	2.69	14.90	33	19	14	CL	1.20	Bajo
1477-327	1	2.66	7.50	61	22	39	CH	7.40	Alto
1477-327	2	2.68	5.30	43	18	25	SC	5.40	Alto
1488-29	1	2.09	14.20	32	22	10	CL	0.00	Bajo
1438-36	1	2.66	15.10	33	22	11	CL	0.00	Bajo
1488-55	1	2.74	13.70	36	25	11	CL	3.80	Medic
1438-91	1	2.64	6.20	33	22	11	SC	0.70	Bajo
1438-146	1	2.67	12.70	67	25	42	CH	9.50	Alto
1617	1	2.68	10.90	42	16	26	CL	4.00	Medio

TABLA 4.11. Analisis de Resultados de Ensayos de Laboratorio en base a dos criterios

Inf. N°	М	Const	. Fis.e I	lid.	Potencial de	Clasificación	Hincham	Grados de
IIIT. IV	m	% L.L.	% L.P.	I.P.	Expansión	U.S.C.S.	iento (%)	Expansión
1477-3	1	32	21	11	Medio	CL	2.00	Medic
1477-4	1	23	21	2	Bajo	ML	0.20	Bajo
1477-5	1	35	25	10	Bajo	SM	0.60	Bajo
1477-7	1	30	20	10	Bajo	CL	1.80	Medio
1477-10	1	38	29	9	Bajo	ML	1.90	Medic
1477-15	1	24	17	7	Bajo	ML-CL	0.60	Bajo
1477-17	1	26	24	2	Bajo	ML	0.90	Bajo
1477-19	1	32	22	10	Bajo	CL	0.00	Bajo
1477-20	1	33	22	11	Medio	CL	0.00	Bajo
1477-42	1	32	24	8	Bajo	ML	2.30	Medio
1477-42	2	32	17	15	Medio	SC	2.50	Medic
1477-44	1	38	22	16	Medio	CL	3.10	Medic
1477-44	2	41	20	21	Alto	CL	4.80	Medic
1477-45	1	37	21	16	Medio	CL	4.70	Medio
1477-45	2	37	18	19	Medio	CL	5.80	Alto
1477-49	1	33	17	16	Medio	CL	2.00	Medio
1477-143	1	29	17	12	Medio	GC	1.10	Bajo
1477-254	1	33	19	14	Medio	CL	1.20	Bajo
1477-327	1	61	22	39	Muy Alto	CH	7.40	Alto
1477-327	2	43	18	25	Alto	SC	5.40	Alto
1488-29	1	32	22	10	Bajo	CL	0.00	Bajo
1488-36	1	33	22	11	Medio	CL	0.00	Bajo
1488-55	1	36	25	11	Medio	CL	3.80	Medio
1488-91	1	33	22	11	Medio	SC	0.70	Bajo
1488-146	1	67	25	42	Muy Alto	CH	9.50	Alto
1617	1	42	18	26	Alto	CL	4.00	Medio

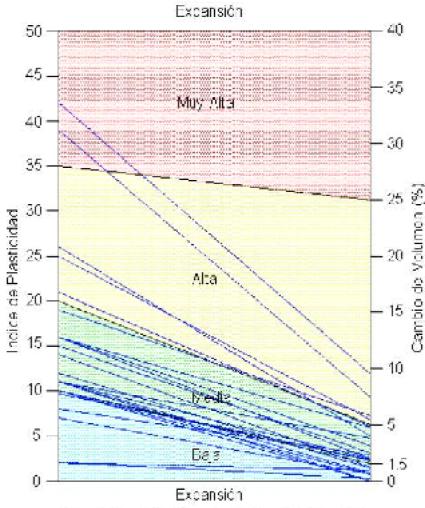


Figura 4.5.. Relación entre Indice de Plasticidad y Porcentaje de Cambio de Volumen para la Identificación del Grado de Expansión FIGURA 4.5

Nota: Los trazos de color azul corresponden a las líneas generadas por la unión de valores de los Índices de Plasticidad con los porcentajes de Cambio de Volumen.

Si observamos la figura 4.5, se pueden visualizar en forma clara los grados de expansión a través de los colores que los identifican, además se pueden observar las líneas que unen los índices de plasticidad y los porcentajes de cambios de volumen los cuales en ciertas oportunidades pasan de un grado de expansión a otro, ya sea mayor o menor, por lo que no se define en forma certera a que grado corresponden cada una de éstas muestras, a diferencia de lo anterior en otros casos las líneas antes mencionadas si se ubican en un sólo grado de expansión, por lo cual es esa eventualidad si se puede identificar un único grado de expansión el que nos entregará una certeza más real.

Como se ha mencionado durante el desarrollo de éste capítulo, los resultados de todas las pruebas de expansión son sólo aproximación, debido a los cambios inevitables

en la humedad y en la estructura de los suelos durante los sondeos, muestreos y manejo de laboratorio. Además como ya sabemos la compresibilidad y también la expansividad de los suelos se han estudiado hasta la fecha con la sola ayuda de la prueba de consolidación estándar y considerando que los informes con los cuales contábamos para hacer este análisis carecen de dicha prueba, hemos utilizado otros ensayos realizados para establecer si existe alguna relación, aunque sea una aproximación aún más incierta que la entregada por la prueba de consolidación.

Por lo tanto podemos decir que efectivamente existe una relación proporcional entre en el índice de plasticidad y los porcentajes de cambio de volumen con los de expansión, es decir, que a medida que aumenta el índice de plasticidad y el porcentaje de cambio de volumen, también aumenta el posible grado de expansión en los suelos finos, en este caso en las arcillas. Debido a que esta relación es sólo una aproximación, para tener una certeza mayor se recomienda realizar una prueba de consolidación estándar, la cual generalmente no se realiza debido a su alto costo económico en comparación con las que generalmente se realiza. Por otro lado si se desea establecer con más detalle la expansión es aconsejable realizar una prueba de rayos X a las muestras con el fin de identificar los minerales que la componen, ya que como vimos en capítulo 2, a presencia de ciertos minerales son los que producen las arcillas, debido a su cambio en la carga eléctrica al encontrarse en contacto con agua.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

La clasificación de suelos consiste en incluir un suelo a un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación, suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de una experiencia considerable. La clasificación de suelos permite resolver muchos tipos de problemas sencillos, y sirve de quía para preparar el programa de experimentación, si la dificultad e importancia del problema requiere una investigación más profunda. La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan pruebas muy sencillas, del tipo indicativo, para obtener las características del suelo necesarias para asignarlo a un determinado grupo. Las características utilizadas más corrientemente son la Granulometría y la Plasticidad. El índice de plasticidad que indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica es una característica especialmente útil del suelo. Debe tenerse presente, sin embargo, que todos los límites e índices, con la excepción del límite de retracción se determina en suelos que se han amasado para formar una mezcla uniforme suelo-agua. Por lo tanto, los límites no dan indicación alguna sobre la estructura del suelo o los enlaces residuales entre partículas que pueden haberse desarrollado en el terreno natural pero que han sido destruidos al preparar la muestra para la determinación de los límites. Como las clasificaciones de suelos se han preparado para servir de ayuda en la resolución de problemas, han surgido clasificaciones adaptadas a muchos tipos de problemas. En 1952 el Bureau of Reclamation y el cuerpo de ingenieros presentaron un "Sistema unificado" destinado a servir para todos los problemas de ingeniería en los que intervinieran suelos. Esta clasificación diferencia los suelos finos de los gruesos a través de la apreciación a simple

vista de las partículas, dentro de las finas dependiendo del límite líquido se distinguen las fracciones de limo, materia orgánica y también las arcillas. La característica diferenciante de la arcilla es la cohesión o resistencia cohesiva, que aumenta al disminuir la humedad. La permeabilidad de la arcilla es muy baja, es difícil de compactar en estado húmedo e imposible de drenar por métodos ordinarios: Compactada es resistente a la erosión y a la tubificación, no es susceptible a hinchamientos por efecto de la helada. Está sometida a expansión y retracción con las variaciones de humedad. Las propiedades dependen no sólo del tamaño y forma, sino también por su composición mineral, es decir, el tipo de mineral arcilloso y el medio químico o la capacidad de intercambio iónico. En general el mineral arcilloso montmorillonita tiene el mayor efecto sobre las propiedades, siendo este efecto mínimo en el caso de la ilita y la caolínita. La clasificación de suelos constituye una ayuda valiosa para el ingeniero. Le da indicaciones generales, transformando de manera empírica los resultados de la experiencia de campo. Sin embargo el ingeniero debe ser precavido al utilizar las clasificaciones de suelos. La resolución de problemas de flujo, asentamientos o estabilidad únicamente a partir de clasificaciones puede llevarle a resultados desastrosos. Es por ello que la prueba de consolidación estándar es prácticamente la única que se ha usado extensamente hasta el presente para estudiar la compresibilidad y expansibilidad de las arcillas. Como se planteo al principio de esta tesis, se utilizaron los informes entregados por el laboratorio Soiltest Ltda, en los cuales no se realizaron las pruebas de consolidación, pero la identificación de las arcillas expansivas se realizó a través de las constantes Físicas e Hídricas y el Porcentaje de Hinchamiento. Como se mencionó dentro del capítulo 4 en el análisis de resultados, la identificación que se estableció es sólo una aproximación, ya que son estimaciones que dan la alerta al profesional a cargo, para que éste de acuerdo a sus conocimientos estime la necesidad de realizar más ensayos como el de consolidación estándar o en ciertas oportunidades una prueba de rayos X para identificar los minerales que componen el suelo en estudio.

Se establecieron dos tipos de identificaciones, la primera en la que el índice de plasticidad nos entrega el potencial expansivo, los cuales poseen una relación directamente proporcional, es decir, a medida que el índice de plasticidad aumenta, también se incrementa el potencial expansivo, aunque su expansión en la realidad depende de variados factores; la segunda identificación al igual que la anterior también presenta una relación directamente proporcional y las variables que se relacionan son el porcentaje de cambio de volumen y los grados de expansión. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, la expansión está parcialmente reprimida. En consecuencia, las magnitudes de la expansión y de sus presiones, probablemente sean en realidad intermedias. Además de los dos tipos de identificaciones, con los datos de la segunda, se ha hecho una relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de cambio de volumen, con lo cual se establecieron áreas de estimación del grado de expansión. Los resultados de los tipos de pruebas no siempre son consistentes, en parte debido a la inevitable variación de las propiedades hídricas. Si las dos pruebas indican un elevado grado de expansión, el suelo debe considerarse sospechoso. Si los resultados de ambas pruebas indican un comportamiento muy expansivo, puede ser justificable tomar precauciones extremas, como por ejemplo solicitar más ensayos para una identificación más certera.

Para finalizar se puede decir que el efecto perjudicial de la expansión en cualquier estructura puede reducirse en cierto grado, pero de ninguna manera eliminarse, dicha reducción puede efectuarse en principio de tres maneras, humedeciendo el terreno previamente hasta que la humedad tenga un valor igual al de equilibrio; tratando que las cargas hacia abajo sean iguales o excedan las presiones producidas por la expansión o bien, impidiendo la expansión químicamente.

Arcillas exp ejecución	ansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil
76	Arancibia Galleguillos, Carolina Alejandra

BIBLIOGRAFIA

- MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA PRACTICA; Karl Terzaghi y Ralph B. Peck; por Oreste Moretto; Editorial "Ateneo", Argentina, 1973.
- MECÁNICA DE SUELOS; Williams Lambe, Editorial "Limusa", México 1972.
- MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS; Tomo 1; Juárez Badillo y Rico Rodríguez; Editorial "Limusa", México, 1996.
- MANUAL DE CARRETERAS; Volumen N° 2: Procedimientos de Estudios Viales; MOP, DGOP, Dirección de Vialidad, Chile, 2001.
- MANUAL OF SOIL LABORATORY TESTING; Volumen 1: Soil Classification and Compaction Tests, K. H. Head; London, First Published 1980, Reprinted with corrections 1984.
- PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN; Second Edition; E. J. Yoder, M. W. Witczak, New York.
- MINERALOGÍA DE ARCILLAS DE SUELOS; Eduardo Besoain; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura "IICA"; Costa Rica, 1985.
- INGENIERÍA DE CIMENTACIONES: FUNDAMENTOS E INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS GEOTÉCNICO; Segunda Edición, Manuel Delgado V., Escuela Colombiana de Ingeniería, Editorial "Alfaomega", Colombia, 1999.
- INGENIERÍA DE CIMENTACIONES; Segunda Edición, Ralph B. Peck, Walter E. Hanson, Thomas H. Thornburn, Editorial "Limusa", México, 1988.

- MECÁNICA DE SUELOS; Segunda Edición, Dimitri P. Kryniné, Editores Tucumán, Buenos Aires, 1951.
- PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE MECÁNICA DE SUELOS; Donald W. Taylor, Compañía Editorial Continental, México, 1961.
- PRINCIPIOS DE GEOLOGÍA Y GEOTECNIA PARA INGENIEROS; Dimitri P. Kryniné, William R. Judd, Ediciones Omega, Barcelona, 1961.
- OPTISCHE BESTIMMUNG DER GESTEINSBILDENDEN MINERALE; Teil 2 Textband, W. E. Tröger, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1967.
 - Laboratorio "SOILTEST Ltda.". Santiago. Sr. Mario Medina.
 - Laboratorio Nacional de Vialidad "LNV", Santiago, Sr. Cristian Solís.
 - Laboratorio "USACH". Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Santiago, Sr. Eduardo Barra Rivera.
 - Laboratorio "LEMCO". Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia. Sra. Gotzone Arteche A.
 - Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Geociencias, Valdivia.
 Sr. Mario Pino Q.
 - · www.geologiaenlinea.com/
 - · www.jmarcano.vr9.com/
 - · www.uned.es/