

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SECCIÓN DE POST-GRADO



**“PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS Y
MECÁNICAS DE LA BENTONITA DE SOCOS -
AYACUCHO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
GEOTÉCNICA**

ING° JOSÉ ERNESTO ESTRADA CÁRDENAS

LIMA - PERÚ

2010

Dedicatoria

*A mi padre **Roberto**, amigo y hombre bueno.*

*A mi madre **Victoria**, In Memoriam.*

*A mis hijos **Victoria N.** y **Joseph E.**, mi alegría de vivir.*

*A **Jenoveva**, esposa y amiga.*

*A mis hermanos **Hernán** y **Roberto**.*

*A mis hermanas **Susy**, **Mery** y **July**.*

*Con todo mi **AMOR**.*

EN NOMBRE DE TODOS LOS MÍOS.

Agradecimientos

*Expreso mi agradecimiento al Profesor Asesor de la Tesis de Investigación
M.I. Ing° Alberto José Martínez Vargas por sus valiosas sugerencias y
orientaciones para culminar el presente tema.*

*A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga (Ayacucho) en
reconocimiento a su abnegada labor de apoyar a sus Docentes a pesar de las
vicisitudes de nuestra realidad actual.*

*A la Universidad Nacional de Ingeniería, por su invaluable labor en la
enseñanza y la investigación , mi agradecimiento a los Ingenieros y personal
técnico del Laboratorio N°2 de Mecánica de Suelos por la colaboración prestada
en la elaboración de este trabajo. A mis Profesores y compañeros.*

Resumen

La Bentonita de Socos, considerado como depósitos no metálicos industrial, se ubica en los alrededores del Distrito de Socos, al borde de la carretera que va de Socos a Ayacucho. De Ayacucho a Socos son 30 minutos por carretera. Los depósitos consisten en estratos lenticulares, subhorizontales, de 2 a 7 metros de espesor, la mayoría de ellos aflorantes. Debe su origen a la alteración de un banco de toba volcánica ínter estratificada con las areniscas y limolitas arcillosas de la Formación Huanta del Neógeno, la alteración de la toba por procesos diagenéticos se produjo en un ambiente lacustrino de medio preferentemente alcalino-sódico.

El material es de color gris claro a blanquecino, muy plástico, arcilloso, notándose en la pasta restos de feldespatos que contenía la toba volcánica antes de su alteración por procesos de hidrólisis.

Los análisis por difracción de rayos X (XRD) muestran que prevalece una esmectita dioctaédrica-montmorillonita como único mineral arcilloso en la mayoría de los depósitos. Los minerales accesorios son cuarzo, feldespato, plagioclasa y cristobalita y en menor proporción ceolitas y yeso. El Ca^+ es el ión intercambiable dominante, junto con Na^+ , Mg^+ y K^+ . El contenido en Fe_2O_3 es muy alto. Estas bentonitas son buenos agentes ligantes en arenas de moldeo para fundición y de propiedades reológicas apropiadas para lodos de perforación de pozos petroleros.

De las propiedades mecánicas de la bentonita, es aprovechable como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radiactivos de baja y media actividad. Además se han venido utilizando en mezclas de suelos en torno a los vertederos, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito.

Recientemente ha surgido una nueva tendencia en el diseño de impermeabilización que se basa en la fabricación de complejos bentonitas-geosintéticos (geomembranas y geotextiles). Consiste en la colocación de una barrera de bentonita compactada entre dos capas, una de geotextil y otra de geomembrana (GCL). La geomembrana es impermeable, mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la bentonita hincharse, produciendo la barrera de sellado compactada.

Abstract

The Bentonite of Socos, considered as non industrial metallic deposits, is located on the surroundings of the district of Socos, on the edge of the highway that goes from Socos to Ayacucho. From Ayacucho to Socos is 30 minutes by car. The deposits consist on sub-horizontal lenticular strata from 2 to 7 meters thick, most of them appear thin. It owes their origin to the alteration of a volcanic tuffa inter stratified with gritty and loamy limonites of the Neogene Huanta formation, the alteration of the tuffa for diagenetic processes took place in an lacustrine ambient of preferably alkaline-sodium medium. The material is light gray to whitish, very plastic, loamy color, being noticed in the remaining of pasta moonstones that contained the volcanic tuffa before its alteration for hydrolysis processes.

The analyses for X-ray Diffraction (XRD) shows that prevails an di-octahedral montmorillonite smectite as the only mineral in most of the deposits. The accessory minerals are quartz, moonstone, plagioclase and cristobalite and celadonite and plaster in a smaller proportion. Ca^{+} is the interchangeable dominant ion, together with Na^{+} , Mg^{+} and K^{+} . The content in Fe_2O_3 is very high. These bentonites are good sealing agents for modelling sands for foundry and have geologic appropriate properties for drilling muds of oil wells.

About the mechanical properties of this bentonite, it is profitable as a sealing material in deposits of toxic and dangerous residuals, like low and medium radioactive activity material. Besides, it has been used in mixtures of floors around the drains, with the purpose of diminishing the permeability of them. This way is impeding the escape of gases or leached generated in the deposit.

Recently a new tendency has arisen in the design of impermeabilization that is based in the production of complex bentonite-geosynthetic (geomembrane and geotextile). It consists on the placement of a compacted bentonite barrier between two layers, one of geotextile and the other of geomembrane (GCL). The geomembrane is waterproof, while the geotextile is permeable, so that it lets the bentonite to swell, producing the barrier of compacted sealed.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Índice general	v
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivo Específico	3
1.3. Organización del Estudio	3
2. Aspectos Geológicos y Geomorfológicos	4
2.1. Ubicación y Localización	4
2.2. Formación Geológica	4
2.3. Geomorfología	5
2.4. Características de la cantera	6
3. Propiedades Físico-Químicas	9
3.1. Forma y Tamaño	9
3.1.1. Superficie Específica	9
3.1.2. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	10
3.1.3. Hidratación e Hinchamiento	11
3.1.4. Plasticidad	11

3.2.	Textura Superficial y Color	12
3.3.	Clasificación de las Bentonitas	12
3.3.1.	Bentonita Tipo WYOMING (Bentonita Sódica)	12
3.3.2.	Bentonita Tipo MISSISIPI (bentonita cálcica)	13
3.4.	Composición Mineralógica y Estructura	13
3.4.1.	Composición Mineralógica de las Arcillas	13
3.4.2.	Estructura de las Arcillas	15
3.5.	Espectrometría y Difracción de Rayos X	23
3.6.	Absorción y Adsorción	28
4.	Propiedades Índices y Mecánicas	29
4.1.	Peso Específico y Peso unitario	29
4.2.	Límites de Consistencia o de Atterberg	30
4.3.	Curva Granulométrica	32
4.4.	Coefficiente de Permeabilidad (k)	33
4.5.	Expansión Libre y Expansión Controlada	34
4.6.	Consolidación Unidimensional	38
4.7.	Resistencia al Esfuerzo Cortante	38
4.8.	Compactación y CBR	39
4.9.	Evaluación Tixotrópica	42
5.	Usos y Aplicaciones en la Ingeniería Civil	47
5.1.	Lodos de Perforación	48
5.2.	Arenas de Moldeo Para Fundición	51
5.3.	Inyecciones Profundas	52
5.3.1.	Usos de las Inyecciones	52
5.3.2.	Medios Inyectables	53
5.3.3.	Ensayos que permiten caracterizar el material a inyectar	53
5.3.4.	Clasificación de las Inyecciones	55
5.3.5.	Técnicas de Inyección	56
5.3.6.	Materiales Inyectables	56
5.4.	Drenajes	61
5.5.	Edificaciones	62
5.6.	Canales de Riego	64
5.7.	Presas de Embalses	65
5.8.	Túneles	66

5.8.1. Tipos de Tuneladoras	66
5.9. Lagunas de Estabilización y Rellenos Sanitarios	67
5.10. Geotextiles (GCL)	68
5.10.1. Material	69
5.10.2. Propiedades y Características	70
5.10.3. Conductividad Hidráulica	70
5.10.4. Resistencia Cortante y Otras Características	71
5.10.5. Pruebas de Control	71
Conclusiones y Recomendaciones	73
Bibliografía	76
Anexos	79
A. Resultados de Laboratorio	79
B. Fotografías	122
C. Planos	130

Índice de tablas

3.1. Áreas Superficiales de minerales de arcilla.	10
3.2. Tabla de CIC de principales minerales de la arcilla.	11
4.1. Tabla de Pesos Específicos.	29
4.2. Tabla de Pesos Unitarios.	29
4.3. Límites de Atterberg.	30
4.4. Clasificación Granulométrica.	32
4.5. Tabla de Rangos de Coeficientes de Conductividad Hidráulica.	33
4.6. Relación entre el Potencial de Hinchamiento y el Índice de Plasticidad	35
4.7. Potencial Expansivo. Altemeyer (1965)	35
4.8. Cambio Potencial de Volumen (PVC). Lambe, 1960	37
4.9. Criterios de Peligrosidad (Jiménez Salas)	37
4.10. Estimación de los Cambios de Volumen en Suelos Expansivos. Holtz y Gibbs, 1965	37
4.11. Criterios de Expansividad. Chen, 1975	37
4.12. Parámetros de Corte	39
4.13. Resultados de Compactación	40
4.14. Resumen de Ensayos de Laboratorio	41
4.15. Relación Líquido/Sólido Vs Tiempo de Gelatinización	44
4.16. Licuación por Ultra Ondas	45
4.17. Energía Requerida Para Licuar Diversas Concentraciones de Geles Tixotrópicos.	45
5.1. Características a Resistencia de la Bentonita en arenas de moldeo	51
5.2. Dosificación empleada en la fila central.	59
5.3. Dosificación empleada en las filas laterales.	60
5.4. Relación de Resistencia Mecánica Vs Tiempo	60
5.5. Granulometría del Suelo de Cimentación	60

Índice de figuras

3.1. El tetraedro elemental o la pirámide triangular.	13
3.2. La Estructura de los silicatos, o el mecano.	15
3.3. El anillo de seis tetraedros.	16
3.4. Una lámina de tetraedros (<i>T</i>).	16
3.5. Una lámina de octaedros (<i>O</i>).	16
3.6. Una lámina <i>T – O</i>	17
3.7. Una lámina <i>T – O – T</i>	17
3.8. El árbol de los caolines.	18
3.9. El árbol de las esmectitas.	19
3.10. La composición de la lámina de <i>T-O-T</i>	20
3.11. El árbol de las micas.	21
3.12. El espesor de las arcillas expandidas.	22
3.13. Difracción de Rayos X.	23
3.14. Interacción de los Rayos X con la materia cristalina.	24
3.15. Difractómetro de Rayos X.	26
3.16. Esquema general de los principales componentes de un difractómetro y del resultado obtenido.	26
3.17. Difractogramas de algunos minerales.	27
4.1. Carta de Plasticidad.	31
4.2. Cambio Potencial de Volumen, Lambe1960.	36
4.3. Actividad, Seed Woodward y Ludgren, 1962.	36
4.4. Prueba de Tixotropía.	44
5.1. Bentonita Cálcica.	47
5.2. Bentonita Sódica.	48
5.3. (Según H. Cambefort 1968):Principio en que se basan los Ensayos Lugeon . .	54
5.4. Principio en que se basan los Ensayos Lefranc	55
5.5. Diferentes formas de cavidades en un Ensayo Lefranc	55

5.6. Ejemplos de Cortinas de Impermeabilización Bajo Presas (Según Foundation Engineering, 1991)	61
5.7. Esquema de Funcionamiento de un Hidroescudo	67
5.8. Configuración General de los GCLs	69
5.9. Colocación de Bentonita en los Geotextiles	70
5.10. Ingreso al Distrito de Socos.	122
5.11. Excavación de Calicatas.	123
5.12. Muestra de Bentonita Superficial.	123
5.13. Calicata de Bentonita.	124
5.14. Vista Panorámica de la Cantera.	124
5.15. Expansión Libre.	125
5.16. Permeabilidad en Pared Flexible.	125
5.17. Muestras de Corte Directo.	126
5.18. Muestras de Corte Triaxial.	126
5.19. Expansión Libre.	127
5.20. Consolidación.	127
5.21. Ensayo del Hidrómetro.	128
5.22. Banco de Consolidación.	128
5.23. Ensayo de Corte Directo.	129
5.24. Celdas Triaxiales.	129

Introducción

1.1. Antecedentes

En la provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, a treinta minutos de la ciudad por la vía Los Libertadores, en el Distrito de Socos, existen yacimientos no metálicos de colores blanquecinos a grises que afloran a la superficie, cuyo material es conocido comercialmente como “Bentonita”. El INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico) en su Boletín N° 61 Serie A Carta Geológica Nacional, correspondiente a la Geología del Cuadrángulo de AYACUCHO (Hojas 27-ñ), hace mención al denuncia minero “IVAN EL PRIMERO” con una breve descripción.

Existen estudios de pre-factibilidad realizados en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, que complementan lo descrito en referencia a la génesis de la bentonita, a su mineralogía, a sus características físico-químicas y propiedades tecnológicas. Por tal motivo el autor en el marco de un proyecto de investigación para la obtención del Grado de Maestro en Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, realizó los ensayos mencionados en el Laboratorio N° 2 de Mecánica de Suelos de la UNI sobre los aspectos citados, cuyos resultados son el objetivo del presente trabajo.

Esmectita es el nombre genérico que recibe un grupo de filosilicatos cuyas composiciones corresponden a la de silicatos aluminicos y/o magnésicos de *Na*, *Ca*, *Mg*, *Fe* y *Li*, hidratados. Las rocas en las que las esmectitas son los minerales dominantes se denominan “bentonitas”, nombre que procede de la localidad de Fort Benton, Wyoming (USA) y, corrientemente, se conoce como bentonita al producto de la alteración, en el entorno de la superficie terrestre (meteorización), de rocas volcánicas ricas en materiales vítreos. El término de bentonita fue definido por Ross y Shannon (1926) como una arcilla originada por alteración de material vítreo ígneo, normalmente de tobas o cenizas volcánicas.

Recientemente, Grim y Güven (1978) redefinieron el término bentonita como cualquier arcilla compuesta predominantemente por esmectitas, independientemente de su origen.

Los depósitos económicamente importantes de bentonita pueden ser de dos tipos: de alteración hidrotermal “in situ” y sedimentarios. La formación de arcillas esmectíticas por alteración hidrotermal requiere un material madre adecuado, tal como rocas ígneas básicas y, especialmente, intermedias que proporcionan plagioclasas como material madre potencial, ya que para que puedan precipitar las esmectitas se necesitan fluidos con altas razones de cationes alcalinos y alcalino-térreos respecto al hidrógeno y que sean ricos en sílice. Este tipo de depósitos suelen ser de dimensiones relativamente pequeñas respecto a los sedimentarios aunque, no obstante, en algunos países tales como Grecia, Italia, Japón, África del Sur y en España, constituyen recursos importantes de bentonitas.

Los depósitos principales de bentonita, a escala mundial, se registran en cuencas sedimentarias del Mesozoico y del Terciario, siendo los más conocidos e importantes los de Wyoming (USA), en donde las bentonitas forman capas de hasta 3 m de potencia y en las que, asociados a la montmorillonita dominante, se encuentran ilita, moscovita, feldespato, cuarzo y ceolitas como componentes minoritarios. La formación de depósitos sedimentarios de esmectitas requiere un ambiente alcalino y confinado que evite la removilización de los cationes relativamente móviles (alcalinos y alcalino-térreos) que entran en su composición.

Entre los factores que favorecen su formación se pueden citar, además de un material precursor adecuado, una cuenca de depósito en la que puedan acumularse por los procesos sedimentarios naturales, que el depósito esté protegido de la erosión tras la formación de la esmectita y que no haya estado sometido a cambios profundos de tipo diagenético y/o metamórfico, por los que las esmectitas se transforman en filosilicatos de mejores cristalinidades y más estables, tales como ilitas y cloritas, según su composición; de ahí que no existan depósitos importantes de bentonitas en formaciones del Paleozoico.

Esencialmente, existen cinco tipos de bentonitas corrientemente utilizadas en la industria: dos de bentonitas naturales, la sódica y la cálcica, y tres de bentonitas tratadas o activadas, la activada con alcalinos, la tratada con ácidos y la bentonita organofílica. El tratamiento de las bentonitas naturales mejora ciertas propiedades y produce materiales con una mayor diversidad de aplicaciones. La bentonita cálcica tratada con alcalinos (polvo de $4Na_2CO_3$ al 4 ó 5 %, con adición de agua hasta alcanzar la plasticidad y calentada a $100^\circ C$) mejora su capacidad de hinchamiento; la bentonita tratada con ácidos inorgánicos, que promueven la disolución de los carbonatos asociados y la del *Fe*, *Al* y *Mg* aumenta de superficie específica y de porosidad; la bentonita organofílica, resultante del revestimiento de las partículas de esmectita sódica por moléculas orgánicas polares con cadenas largas, se hace hidrofóbica y apta para la intercalación de moléculas orgánicas (disolventes u otros agentes) y forma una estructura gelatinosa, espesadora y tixotrópica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Determinar las Propiedades Físico-Químicas y Mecánicas de la bentonita ubicada en el distrito de Socos - Ayacucho.

1.2.2. Objetivo Específico

- Demostrar que la bentonita de Socos puede ser empleada para dar solución a los diversos problemas que se presenten en la Ingeniería Civil.

1.3. Organización del Estudio

El desarrollo del tema de Tesis de Maestría es de la siguiente forma:

- En el **CAPÍTULO 1** se realiza la introducción sucinta del tema.
- En el **CAPÍTULO 2**, se analiza la información geológica y geomorfológica de la cantera en estudio, en base al Boletín Geológico del INGEMMET del cuadrángulo correspondiente a Ayacucho.
- En el **CAPÍTULO 3**, se realiza la caracterización físico-química de las tres muestras representativas extraídas de la cantera y su análisis en el Laboratorio Geoquímico del INGEMMET.
- En el **CAPÍTULO 4**, se realiza los ensayos de laboratorio de las Propiedades Índices y mecánicas de las tres muestras representativas de la cantera para determinar los parámetros mecánicos básicos y tecnológicos y sus posibles alternancias de uso desde el punto de vista ingenieril, en la que dicha actividad se realizó en el Laboratorio N° 2 de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- En el **CAPÍTULO 5**, se muestran las diversas posibilidades de empleo y aprovechamiento del material en la Ingeniería Civil.

Aspectos Geológicos y Geomorfológicos

2.1. Ubicación y Localización

El área estudiada se encuentra ubicada en el departamento de Ayacucho, provincia de Huamanga, distrito de Socos, entre las coordenadas UTM:

8 540 600 N	579 120 E
8 539 220 N	578 530 E
8 540 540 N	575 420 E
8 541 140 N	575 940 E

Distante 30 Km de la ciudad de Ayacucho en la vía Los Libertadores, en los alrededores del distrito de Socos se encuentran afloramientos blanquecinos-grisáceos de depósitos naturales de bentonita masiva, se pueden observar al borde de la carretera de acceso al distrito de Socos.

2.2. Formación Geológica

En la Carta Geológica de Ayacucho se muestra el afloramiento de rocas sedimentarias, volcánicas y vulcano-sedimentarias con edades correspondientes al Pérmico superior, Triásico superior-Liásico, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario. Entre estas unidades existen discordancias considerables que indican estados de intensa erosión o no deposición. Las rocas paleógenas-neógenas ocupan una cuenca sedimentaria continental que adquiere su pleno desarrollo probablemente en el Paleógeno, con varias fases parciales de subsidencia y en forma subsecuente. Esta cuenca controla la deposición de las capas rojas de la Formación Socos y las secuencias vulcano-sedimentarias de las Formaciones Huanta y Ayacucho; asimismo, el ascenso de las magmas en el Mio-Plioceno. Las rocas cuaternarias comprenden depósitos fluvio-glaciares, aluviales, coluviales y lagunares.

En la zona del distrito de Socos, aflora la Formación Socos constituido por conglomerados, areniscas finas y limolitas que en conjunto dan un color rojizo. Sobre esta formación se encuentra la Formación Huanta que litológicamente en la base está constituido por areniscas y micro conglomerados con clastos redondeados o semiredondeados en una matriz tufo-arcillosa. Hacia arriba siguen areniscas y limolitas abigarradas variando de tonos amarillos o blanquecinos por su contenido tufáceo y por la alteración de la matriz carbonatada. La plasticidad de las arcillas (bentonita y arcillas rojas), el yeso y los carbonatos han favorecido el plegamiento que afecta a esta unidad.

Hacia la parte alta la secuencia cambia a limolitas y areniscas limolíticas de grano fino y de color gris amarillento intercalados con conglomerados y areniscas de gruesa composición cuarzo-feldespática en la cual se observa abundantes ferro magnesianos en una matriz arcillo carbonatada.

En esta parte la Formación Huanta tiene una potencia aproximada de 200 metros e intrayace en evidente discordancia a la Formación Ayacucho.

2.3. Geomorfología

El desarrollo geomorfológico del área estudiada es el resultado de procesos tectónicos sobrepuestos por los procesos geodinámicos que han dado el modelado actual de la región. Entre los procesos tectónicos que han controlado el modelado se tiene el fallamiento muy probablemente en bloques, que han dado origen a la cuenca Ayacucho, así como también a los diversos plegamientos existentes; aunado a esto se tiene la intensa erosión causada por los diversos ríos y quebradas existentes, y la litología de las diversas unidades estratigráficas que han dado la configuración actual del relieve, pudiendo diferenciarse las siguientes unidades:

- Contrafuerte de la Cordillera Oriental
- Zona de Conos Volcánicos
- Zona de Altas Cumbres
- Altiplanicies
- Penillanuras Disectadas
- Estribaciones Orientales de la Cordillera Occidental
- Valles Encañonados

La bentonita de Socos se ubica en esta extensa área constituida por una cadena de cerros, los cuales vienen a ser los contrafuertes orientales de la Cordillera Occidental. Esta unidad

presenta una morfología bastante abrupta con picos que sobrepasan los 4 200 m.s.n.m. y las geoformas glaciares, valles en U , circos glaciares y depósitos fluvio-glaciares; estas se encuentran en rocas volcánicas de diversas formaciones y del Grupo Mitu.

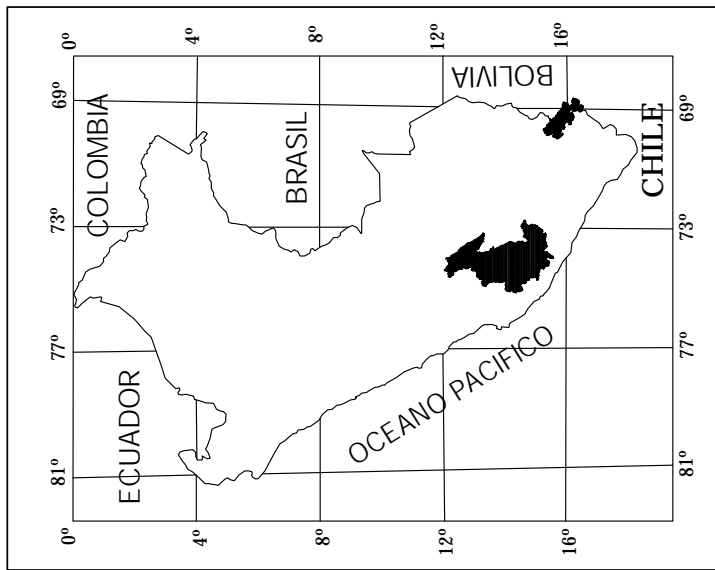
2.4. Características de la cantera

El depósito de bentonita se ubica en una topografía accidentada y de deslizamientos activos. Posiblemente su origen se debe a la alteración de un banco de toba volcánica interestratificado con areniscas y limonitas arcillosas de la Formación Huanta.

La alteración de la toba por procesos diagenéticos se produjo en un ambiente lacustrino de medio preferentemente alcalino. El banco bentonítico tiene una extensión aproximada de 2,500 metros con potencias que varían entre 2 a 7 metros con rumbos de 20 - 30° E y buzamiento de entre 12 - 25° SE.

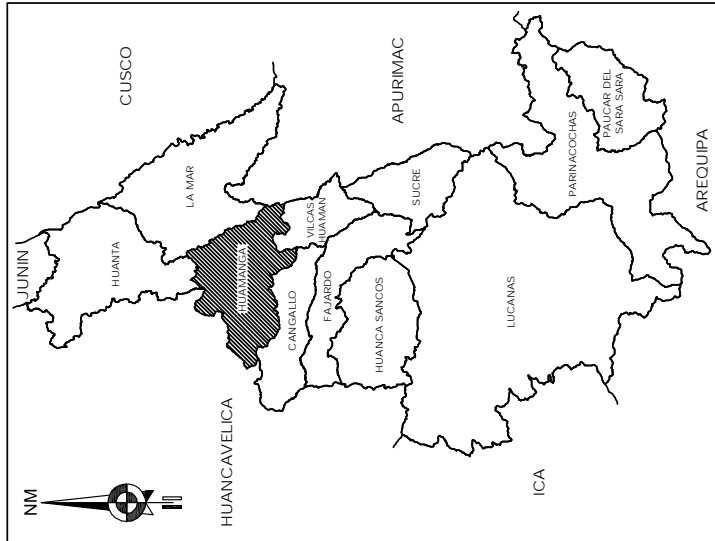
El material bentonítico es de color gris claro medianamente plástico y considerable aumento de volumen en contacto con el agua, encontrándose en la pasta restos de feldespatos que tenía la toba volcánica antes de su alteración por hidrólisis. La importancia del yacimiento radica en su alto contenido de arcilla montmorillonita, conforme se determina en el análisis efectuado.

Se tomaron muestras de las partes de mejor exposición en las calicatas Ca-1 , Ca-2 y Ca-3 de 1 a 1.5 metros de profundidad y los análisis físico-químicos se realizaron en el INGEMMET y los ensayos mecánicos en el Laboratorio N°2 de Mecánica de Suelos de la UNI. Las reservas inferidas son estimadas entre los 15 000 000 TM y las comprobadas en mayor a los 6 350 000 TM.

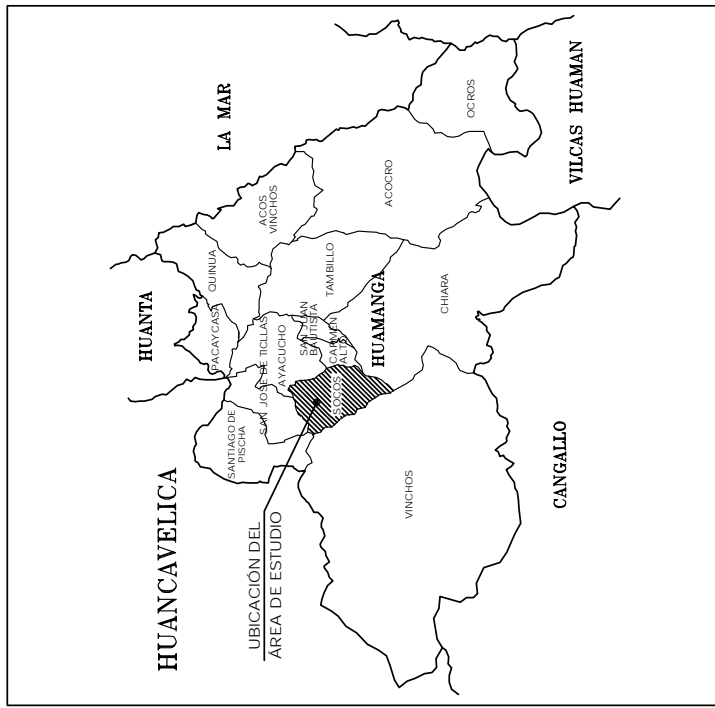


MAPA DEL PERU
ESCALA 1/2'500,000

EXTENSION TERRITORIAL NACIONAL: 1 285 215.60 Km².
EXTENSION TERRIT. DEP. DE AYACUCHO : 44 181.04 Km².



DEPARTAMENTO AYACUCHO



PROVINCIA HUAMANGA

TESIS DE MAESTRIA :

PROPIEDADES F-Q Y MECÁNICAS DE LA BENTONITA DE SOCOS - AYACUCHO

DPTO :	AYACUCHO	PLANO :	BE-01
PROVINCIA :	HUAMANGA	UBICACIÓN :	
DISTRITO :	SOCOS	DISEÑO :	Ing. ESTRADA CARDENAS, José Ernesto
LUGAR :	AMPUCCASA	FECHA :	MARZO 2006

COLUMNA ESTRATIGRAFICA GENERALIZADA DEL CUADRANGULO DE AYACUCHO

Eratema	Sistema	Serie	Unidad	Gruesor aprox. en mts.	Columna	Descripción litológica	
Cenozoica	Cuaternario	Holocena	Dep. Aluviales			Gravas redondeadas de tamaño variable en una matriz areno-limosa.	
			Dep. Coluviales			Clastos angulosos de diversos tamaños en una matriz limosa.	
		Pleistocena	Dep. Glaciofluvial			Limoarcillitas y gravas debilmente compactadas.	
			Volc. Atunsulla	< 400			Brecha de erupción en la parte inferior, seguido por tobas de color blanco a rosado de naturaleza riolitica, textura porfirítica
	Neógeno	Pliocena	Fm. Huari	> 100	Lavas latíticas oscuras, piroclásticos freatomagmáticos, conos de escoria, tobas.		
			Gpo. Barroso	Volc. Yanamachay	> 100	Tobas riolíticas blancas en capas gruesas (facies distal), toba soldada negra limoarcillitas y arcillitas en capas delgadas de poco espesor.	
				Volc. Tutayacc Orcco	> 500	Lavas andesíticas oscuras, con fenos de clinopiroxenos, textura fluidal.	
		Volc. Lucho Jahuana Pampa		> 300	Lavas y brechas de erupción andesíticas, de color gris oscuro a negro, afaníticas, capas subhorizontales presentan textura fluidal.		
		Miocena	Fm. Rumihuasi	Fm. Acobamba	Fm. Ayacucho	> 200	Fm. Rumihuasi: tobas de composición riolitica, limoarcillitas, equivalente a la Formación Ayacucho (?).
						> 300	Fm. Acobamba: limolitas claras, lodolitas y areniscas de grano fino, algunas intercalaciones de tobas.
						> 700	Fm. Ayacucho, Miembro superior: efusivo, lavas intercaladas con brechas de erupción y piroclásticos.
			Fm. Molinoyoc	> 400	Fm. Ayacucho, Miembro inferior: explosivo, tobas (ignimbritas), tobas retrabajadas, limoarcillitas, diatomitas y areniscas grano fino.		
			Fm. Huanta	3 2 1 > 2000	Derrames lávicos alternados con brechas y estratos de lapilli y ceniza.		
			Fm. Sallalli	> 300	Tobas y flujos piroclásticos en bancos mediancos. Derrames de lavas, intercaladas en areniscas finas Flujos laharios alternando con areniscas Areniscas rojas alternadas con lutitas blanquecinas		
	Paleógeno	Oligocena	Fm. Ticllas	> 500	Derrames andesíticos, meteorizados con coloración rojizo a violacia, intercalación de aglomerados lapillíticos y conglomerados volcánicos		
		Eocena	Fm. Socos	> 300	Tobas soldadas de colores claros, lavas de color gris con tonalidades azuladas y rosadas, textura porfirítica fluidal en bancos delgados y gruesos.		
	Mesozoica	Jurás.	Triás.	Gpo. Pucara	> 800	Conglomerados polimicticos, areniscas finas, limolitas y lodolitas rojas, lutitas negras, algunas intercalaciones de yeso, coloración típica rojiza.	
						Calizas gris claras, micriticas.	
Paleozoica	Pérmico		Gpo. Mitu	> 1500	Tobas riolíticas soldadas con textura fluidal ('fiamme'). Lavas andesíticas - riolíticas con fenos de plagioclasa; brechas, piroclásticos riolíticos morados intercalados con lavas verdosas porfiríticas;		
			Complejo Granítico de Querobamba		Granito blanco-rosado textura granular, hipidiomorfa con fenos de ortosa, plagioclasas, cuarzo, y hornblenda.		

Propiedades Físico-Químicas

3.1. Forma y Tamaño

Las esmectitas pueden presentar gran variedad de tamaños de cristal y morfologías. Suelen aparecer en cristales de tamaño variable entre 2 y 0,2 μm y morfologías de tipo rómbico o hexagonal (escamas), tabular o laminillas e incluso fibroso. Son mas frecuentes, en este tipo de minerales, los agregados cristalinos que los cristales aislados. Grim y Güven (1978) hacen una clasificación de los distintos tipos de agregación que suelen presentar: globulares, musgosos, laminares, laminares compactos, foliados o reticulados. La forma, tamaño y disposición de las partículas ejercen una gran importancia en las propiedades reológicas de las bentonitas.

A continuación se enumeran y describen algunas de las propiedades fisicoquímicas de mayor interés en la utilización de los materiales de bentonita.

3.1.1. Superficie Específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que ésta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Las bentonitas poseen una elevada superficie específica (150 - 800 m^2/g), muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

Las propiedades de las bentonitas están controladas por sus superficies, de manera que, si la partícula de arcilla no es activa químicamente (no tiene carga eléctrica) se comportara como cualquier otra partícula de su mismo tamaño y forma. Por ello, la existencia en los minerales de la arcilla de cargas superficiales descompensadas será responsable de su reactividad superficial, que les confiere las principales propiedades fisico-químicas (absorción, adsorción, intercambio catiónico e hidratación) y físicas (plasticidad, comportamiento reológico), que hacen de las arcillas materiales de un elevado interés industrial.

Mineral de la Arcilla	Área Superficial (m^2/g)	Área Total (m^2/g)
Esmeclita	50 – 100	800
Vermiculita	10 – 40	800
Clorita	15	15
Caolinita	15 – 30	15 – 50
Illita	10 – 50	50 – 100
Sepiolita	150 – 300	900
Palygorskita	150 – 280	915

Tabla 3.1: Áreas Superficiales de minerales de arcilla.

3.1.2. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Es una propiedad fundamental de las esmeclitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomorfas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina. En el caso de las bentonitas la capacidad de intercambio catiónico varía entre 80 y 150 meq/100 g.

Mineral de la Arcilla	CIC (meq/100g)
Esmeclita	80 – 150
Vermiculita	100 – 150
Clorita	10 – 40
Caolinita	3 – 15
Halloysita	5 – 50
Illita	10 – 40
Sepiolita	10 – 20
Palygorskita	10 – 20

Tabla 3.2: Tabla de CIC de principales minerales de la arcilla.

3.1.3. Hidratación e Hinchamiento

Todas las arcillas atraen agua a sus superficies (adsorción), pero sólo algunas la introducen en su estructura (absorción). La adsorción es la adición de moléculas de agua sobre la superficie de la partícula arcillosa; la absorción es la incorporación de moléculas dentro del cristal. Algunos minerales como las esmeclitas atraen agua sobre la superficie, pero también entre las láminas de su estructura, lo que provoca la formación de hidratos y cambios de volúmenes.

La hidratación y deshidratación de la superficie interlaminar son también propiedades únicas de las esmeclitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos de la bentonita. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión lámina y la energía de hidratación del catión. Cuando el catión interlaminar es el Na^+ , las esmeclitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, y si por el contrario, tienen Ca^{2+} ó Mg^{2+} como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

3.1.4. Plasticidad

Las esmeclitas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma un recubrimiento sobre las partículas laminares de esmeclita produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las esmeclitas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, extremadamente pequeño tamaño de partícula (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

3.2. Textura Superficial y Color

Las arcillas son productos secundarios de la corteza terrestre, originados por efecto del intemperismo (descomposición y alteración) de minerales primarios tales como ferromagnesianos, feldespatos, y micas, los cuales a través de subsecuentes etapas de meteorización forman la mayoría de arcillas minerales estables, como caolín, talco y mica.

La bentonita, designa un tipo de arcilla del grupo de las esmectitas. Los depósitos de bentonita se encuentran en forma de capas o cuerpos lenticulares intercalados con lutitas y areniscas lacustres y marinas, cuyas capas varían desde centímetros hasta metros. Son pocos los que pueden alcanzar capas de 15 metros.

Las bentonitas pueden ser de diversos colores, desde el blanco hasta el gris, amarillo, verde, azul y negro; sin embargo, en los afloramientos el color amarillo o verde amarillento es el más frecuente, y que se debe a la acción del intemperismo. Frecuentemente tienen características de apariencia cerosa y jabonosa.

La bentonita está compuesta principalmente de montmorillonita (no menor del 85%), la cual procede de cenizas volcánicas, en forma de láminas muy finas con un diámetro rara vez mayor de 0,05 micrones; así mismo por otros minerales arcillosos como la beidellita, illita y caolinita (estos dos últimos entre el 5 al 10% del total), cristobalita en menor proporción, a veces zeolitas, micas, feldespatos, cuarzo, piroxenos, zircón, atapulgita, sepiolita, calcita, y en general minerales pertenecientes a rocas ígneas y minerales detríticos.

3.3. Clasificación de las Bentonitas

Entre los tipos de bentonitas, las más comerciales son:

3.3.1. Bentonita Tipo WYOMING (Bentonita Sódica)

El ión sodio es permutable, cuya característica más destacada es su excepcional afinidad por el agua, caracterizada por su alta capacidad de hinchamiento en su estructura (Swelling), pudiendo aumentar hasta 15 - 25 veces su volumen y 30 - 50 veces su peso, formando una masa plástica, gelatinosa y deslizante, de apariencia de jabón blando. Su propiedad es de formar suspensiones coloidales en agua. Esta arcilla es ampliamente utilizada para los lodos de perforación de los pozos de petróleo. La bentonita sódica se conoce en el mercado mundial con los nombres de acuagel, macogel, quickgel y barroco, entre otros.

3.3.2. Bentonita Tipo MISSISIPI (bentonita cálcica)

El ión permutable en este caso es el Ca^{+2} , es llamado también sub-bentonitas, presenta una baja hinchabilidad, pero adquieren la propiedad de decolorar muchos tipos de aceites, grasas, u otros líquidos en su estado natural compitiendo con las tierras Fuller.

Perú cuenta con varios yacimientos de bentonita, ubicados en la zona central (Junín), norte (Piura) y sur (Ica) del país. En su composición mineralógica asocia pequeñas porciones de cuarzo, algo de biotita y óxidos de hierro dispersos en la masa.

3.4. Composición Mineralógica y Estructura

3.4.1. Composición Mineralógica de las Arcillas

Los silicatos están formados por cristales regulares, que a escala molecular están formados por planos y caras muy bien definidos, yendo a una escala más pequeña, se vería que estos cristales tienen a su vez una unidad básica: el tetraedro (en griego “cuatro caras”), tal y como se ilustra en la figura 3.1. Este es el *tabique elemental* con que se pueden construir los edificios moleculares que forman a los silicatos.

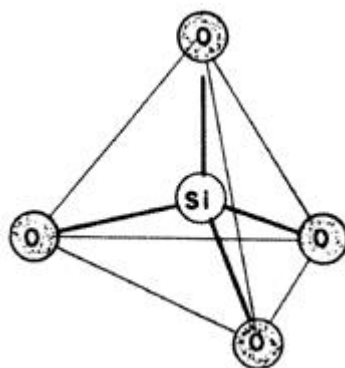
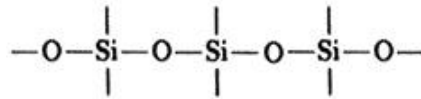


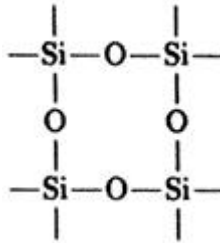
Figura 3.1: El tetraedro elemental o la pirámide triangular.

El tetraedro de la figura 3.1 está compuesto por un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno en las esquinas (O).

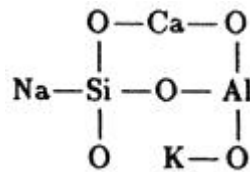
Si cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas, es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando así saturado el átomo central (Si), mientras que las esquinas todavía tienen una carga negativa para enlazarse a otro átomo con carga positiva. Cuando esto último ocurre, entonces se puede formar una cadena de tetraedros, mediante los enlaces del tipo:



Similarmente, mediante este mecanismo se pueden formar cadenas verticales que se unen a las cadenas horizontales para formar redes, de la manera siguiente:



Si se sigue armando este “Mecano”, se puede superponer una red encima de otra, a manera de formar arreglos tridimensionales. También se puede sustituir uno de los átomos de silicio por otro, por ejemplo de aluminio (*Al*), con lo cual el arreglo quedaría desbalanceado, ya que el aluminio sólo tiene tres cargas eléctricas positivas en vez de cuatro, dejando una carga negativa “extra” en uno de los átomos de oxígeno, por ejemplo:



Como se observa en este esquema, la carga negativa desbalanceada puede ser satisfecha por un catión positivo, por ejemplo el sodio (*Na*) o el potasio o calcio (*K, Ca*), con lo cual se logra nuevamente una estructura neutra.

Se puede armar el mecano de manera que un tetraedro (*1T*) pueda unirse a otro para formar un arreglo tipo *2T* (dos tetraedros) o bien *3T*, etc. Así, en la figura 3.2 se reúnen todas las posibles combinaciones de tetraedros que dan origen a una serie de vistosas geometrías, en forma de cadena simple, doble, redes de motivos hexagonales, etc. Lo más sorprendente es que cada uno de estos arreglos es típico de alguno de los silicatos minerales más conocidos. Así, se ve que el mineral circón está compuesto de tetraedros aislados (*1T*), mientras que los piroxenos están compuestos por cadenas simples de un número infinito de miembros (*nT*). En particular, las redes de tetraedros que se extienden a lo largo y a lo ancho, formando hojas completas, constituyen el grupo de filosilicatos, o estructuras laminares, del que forman parte las arcillas.

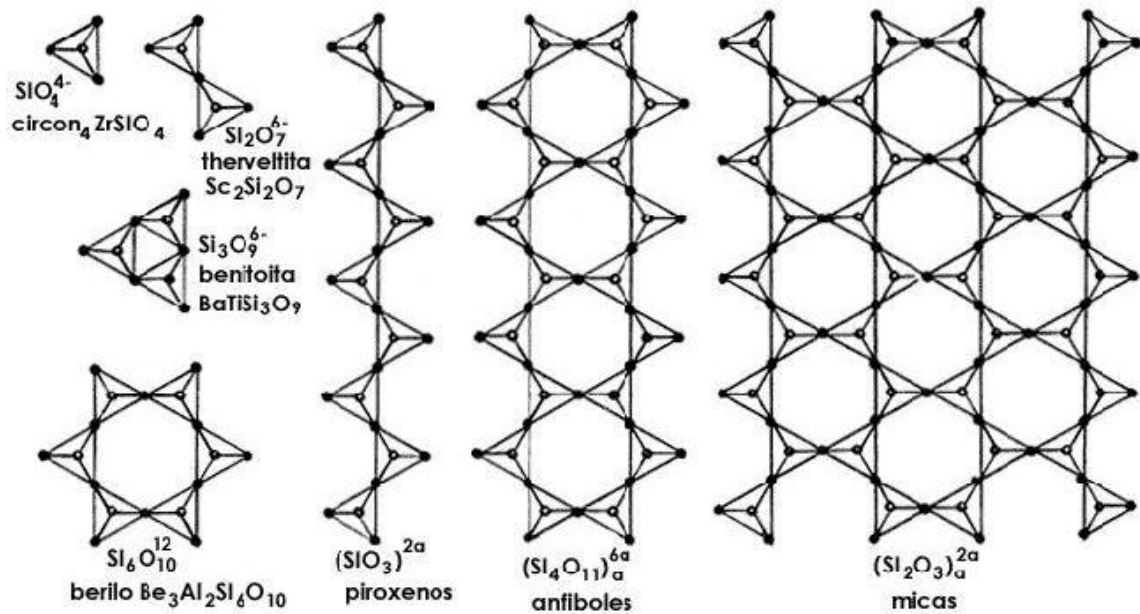


Figura 3.2: La Estructura de los silicatos, o el mecano.

Una propiedad extraordinaria de estas estructuras es su posibilidad de ser capaces de sustituir al átomo de silicio (Si), situado en el centro de los tetraedros (figura 3.1), por otro de menor carga como el aluminio (Al^{3+}), generando así una deficiencia de carga positiva, o un exceso de carga negativa en el tetraedro, la cual necesita atraer a otros cationes para compensarse, por ejemplo Na, K, Ca, etc. Este es el mecanismo que permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio iónico, tan importantes que a ellas se deben las propiedades catalíticas de las arcillas. Esto es un ejemplo típico de lo que ocurre a menudo en la química, es decir, que los arreglos cristalinos, las sustituciones, etc., representan aspectos físicos, que ocurren a escala molecular, estableciendo o modificando las propiedades químicas de los materiales: fundamento de las propiedades químicas de las sustancias es la física que ocurre a escala molecular.

3.4.2. Estructura de las Arcillas

Se ha visto cómo la unión de varios tetraedros genera hojas que se extienden a lo largo y a lo ancho, dando origen a las estructuras laminares. Veamos de cerca qué ocurre al unir los vértices para formar anillos tipo $6T$ (seis tetraedros), como se muestra en la figura 3.3. Las puntas de los tetraedros se encuentran a la misma altura, formando un plano, de igual manera ocurre con los átomos de silicio situados en el centro de los tetraedros y con los de oxígeno situados en las bases. La articulación de esos tres planos conduce pues a la formación de una *hoja tetraédrica* (tipo T).

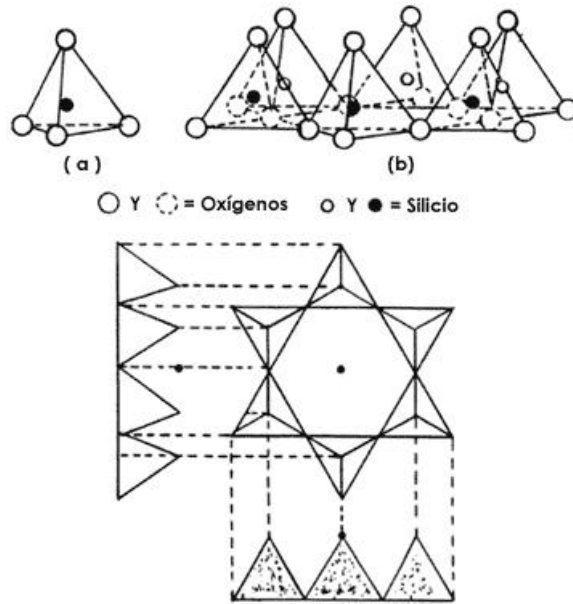


Figura 3.3: El anillo de seis tetraedros.

Siguiendo esta secuencia, se puede ahora unir dos hojas para formar una *lámina tetraédrica*, tal y como se ilustra en la figura 3.4. En ésta se observa que las dos hojas se encuentran invertidas, una con respecto a la otra, compartiendo uno de los vértices.

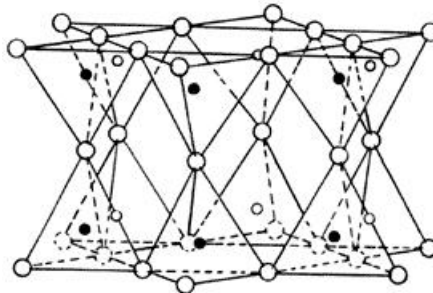


Figura 3.4: Una lámina de tetraedros (T).

Similarmente, existen otros cuerpos poligonales que se pueden unir entre sí para formar cadenas, tal y como ocurre con el octaedro, representado en la figura 3.5. Formación típica de los compuestos de aluminio, por ejemplo $Al(OH)_6$, o del magnesio. Este arreglo es una *hoja octaédrica* (tipo O).

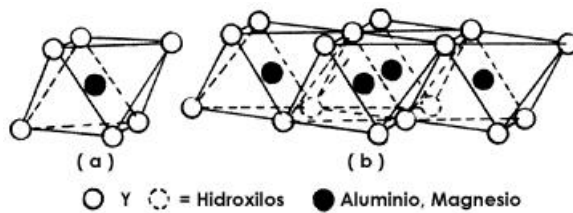


Figura 3.5: Una lámina de octaedros (O).

Ahora bien, la unión de una hoja del tipo T , con otra del tipo O , genera una *lámina* $T-O$, o *lámina 1:1*, tal y como se ilustra en la figura 3.6. La coincidencia, sin embargo, no es perfecta cuando se trata de hojas T formadas por silicio-oxígeno y de hojas tipo O formadas por *aluminio-oxígeno-oxhidrilo*, lo cual crea un efecto de esfuerzo entre las hojas que es de gran importancia para algunas de las aplicaciones de las arcillas que presentan este tipo de láminas ($T-O$), por ejemplo el caolín.

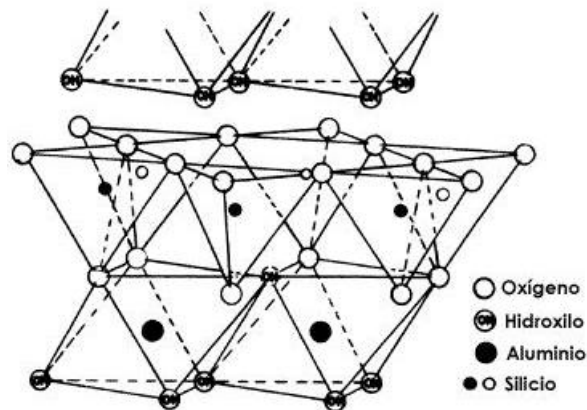


Figura 3.6: Una lámina $T-O$.

Ahora se termina la secuencia agregando una tercera hoja tipo T a la lámina $T-O$ mencionada arriba y el resultado se ilustra en la figura 3.7, que muestra la lámina $T-O-T$, o como algunos la llaman: *la estructura de sandwich*, debido a que dos hojas tipo T se asemejan a los panes del sandwich, mientras que el jamón correspondería a la hoja tipo O . Esta lámina tiene pues dos hojas T y una hoja O , o sea la lámina es del tipo $2:1$.

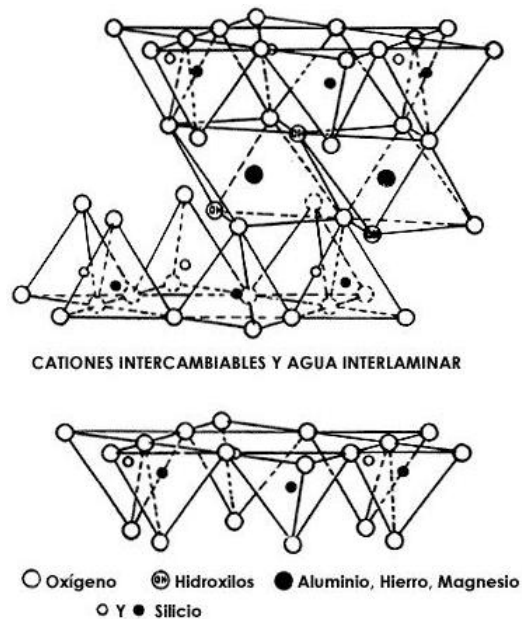


Figura 3.7: Una lámina $T-O-T$.

Hasta aquí termina el juego del mecano, ya que la lámina $T - O - T$ es la más completa y no acepta una nueva adición, debido a la saturación de los enlaces. Una cosa es clara en este punto: las estructuras de sandwich son nada menos que “*la parte esencial de las arcillas*”. Por si hubiese alguna duda al respecto, se ilustrará la importancia de las estructuras formadas por las láminas tipo $1:1$ y aquellas formadas por las láminas tipo $2:1$.

a) **GRUPO 1:1**

Los Caolines

El nombre caolín proviene de la voz china “Kau-Ling”, nombre del cerro de una región situada al norte de China de donde se extraía esta arcilla desde el siglo VIII d.C., para la fabricación de la porcelana. La unidad fundamental de la estructura del caolín es la lámina $T - O$, o sea la lámina $1:1$, una hoja de tetraedros de *silicio-oxígeno* unida a otra hoja de octaedros de *aluminio-oxígeno-OH*. La sustitución del silicio por otro elemento, como el aluminio, o bien la sustitución del aluminio en la hoja tipo O por otro elemento de menor carga, por ejemplo el magnesio, causa un cambio químico en el material pero mantiene esencialmente la misma estructura. Estas sustituciones dan origen a la familia de los caolines (figura 3.8).

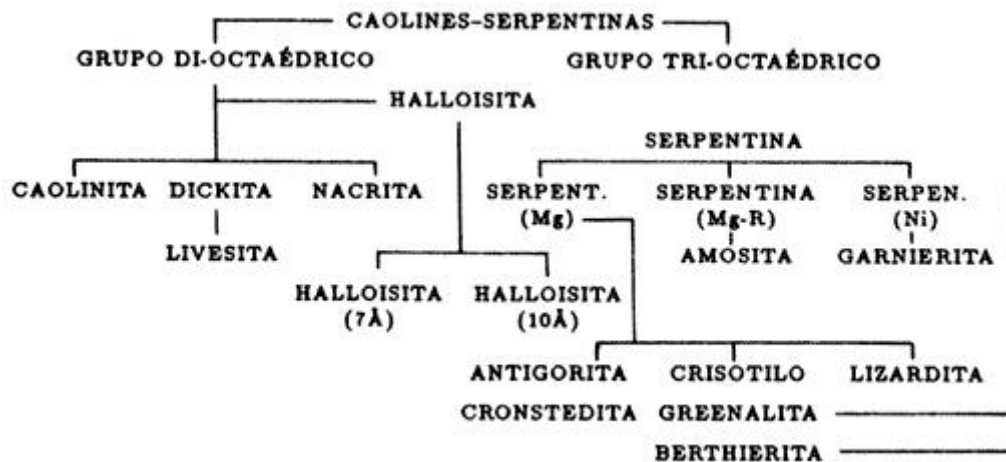


Figura 3.8: El árbol de los caolines.

b) **GRUPO 2:1**

b.1) *Las Esmectitas*

La familia de las esmectitas está formada por todas aquellas arcillas que presentan una estructura de “*sandwich*”, es decir, que está constituida por dos hojas de tipo T y por otra intermedia de tipo O . La fórmula estructural típica de estas arcillas es la siguiente:



Esta estructura es eléctricamente neutra debido a que todas las posiciones en la hoja T se encuentran ocupadas por átomos de silicio, mientras, que todas las posiciones de la capa O contienen aluminio. Ésta es la fórmula típica de la pirofilita. Sin embargo, tal y como se muestra en la figura 3.9, existen numerosas ramas en el árbol de las arcillas, las cuales presentan la misma estructura de sandwich, excepto que algunas veces el aluminio sustituye al silicio parcialmente en la capa T , o bien el magnesio o el hierro sustituyen al aluminio en la capa O , e inclusive el flúor (F) pudiera sustituir al oxígeno de la capa O . Luego, estas diferencias de composición química hacen que las propiedades de cada arcilla mineral sean distintas.

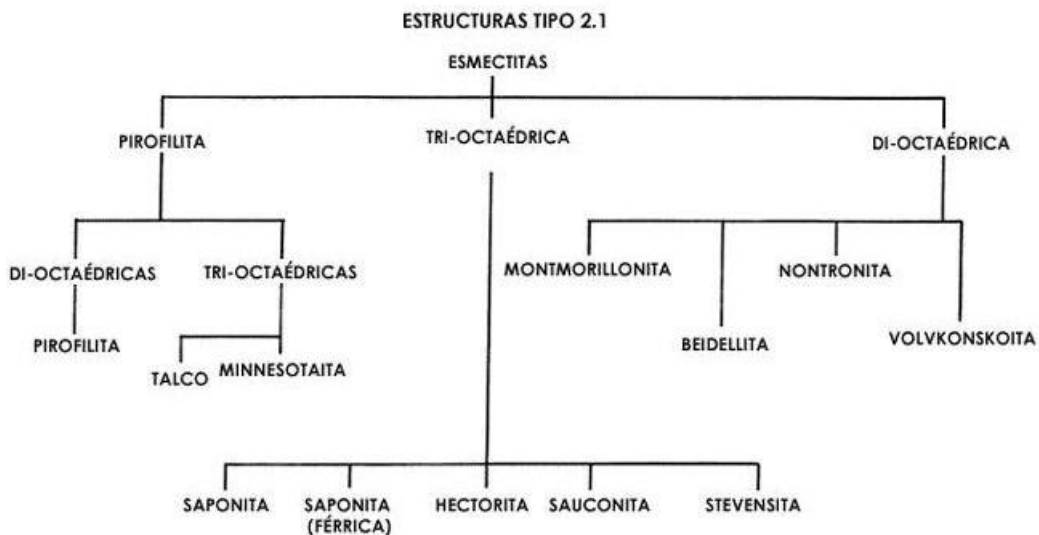
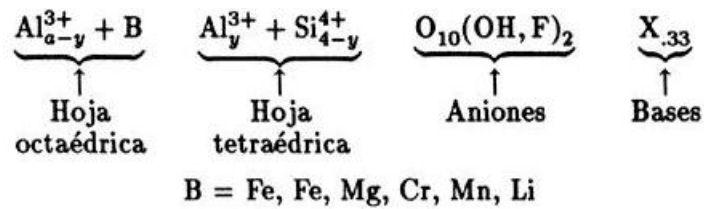


Figura 3.9: El árbol de las esmeclitas.

Entre todas las esmeclitas, la rama de las arcillas di-octaédricas presenta propiedades muy interesantes, derivadas por supuesto de su estructura laminar, de su espacio interlaminar y de la carga residual. La figura 3.10 ilustra la composición de las láminas $T-O-T$ para todas las arcillas del tipo esmeclita, es decir, las láminas tipo 2:1. Entre ellas destaca la montmorillonita, cuyo nombre se deriva del francés Montmorillon, lugar de Francia en que se encontró esta arcilla típica en 1874. La composición química de una arcilla esmeclita, tipo montmorillonita, es la siguiente:



Como se observa en esta fórmula estructural, la hoja tetraédrica está compuesta sólo de silicio y aluminio mientras que la hoja octaédrica contiene aluminio y una variedad de cationes (*B*). Esto ilustra perfectamente la gran variedad de arcillas tipo esmectita que se pueden conseguir simplemente cambiando el catión de la hoja octaédrica y manteniendo ocupada la hoja *T* con *Si* y *Al*, para cada caso. Por supuesto, la sustitución de aluminio (*O*) y silicio (*T*) por un catión de menor carga eléctrica, por ejemplo *Mg*, origina una deficiencia de carga eléctrica que es responsable de algunas de las propiedades superficiales más importantes de las arcillas: la capacidad de intercambio, la absorción de moléculas polares como el agua, así como de otros compuestos orgánicos, por ejemplo las aminas, las cuales al introducirse en el espacio interlaminar causan el hinchamiento de la estructura laminar de las arcillas.

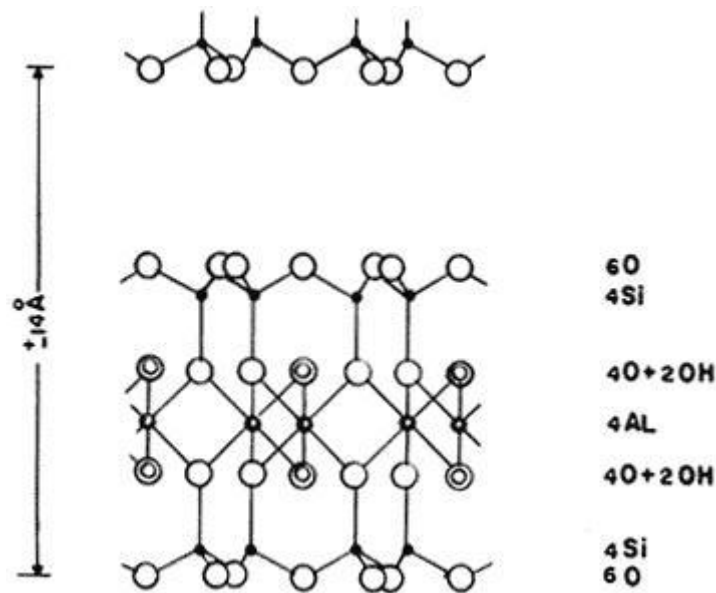


Figura 3.10: La composición de la lámina de *T-O-T*.

Debido a su avidez por el agua y las moléculas orgánicas, las montmorillonitas encuentran aplicaciones muy variadas que van desde la extracción de esencias naturales hasta la fabricación de catalizadores para procesar los hidrocarburos derivados del petróleo. Los mecanismos que intervienen a escala molecular para llevar a cabo estas reacciones serán explicados en los capítulos siguientes, por ahora sólo se mencionará que: la es-

estructura de sandwich y el grado de sustitución catiónica determinan en gran medida las propiedades de las arcillas.

b.2) *Las Micas*

Las micas son los minerales clasificados como arcillas que tienen la misma estructura que las esmectitas, excepto que el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan entre láminas, por ejemplo el potasio, hacen que la carga residual sea muy alta. En estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras haciendo que su estructura no sea expansible, ni sus cationes interlaminares intercambiables. La familia de las micas se ilustra en la figura 3.11

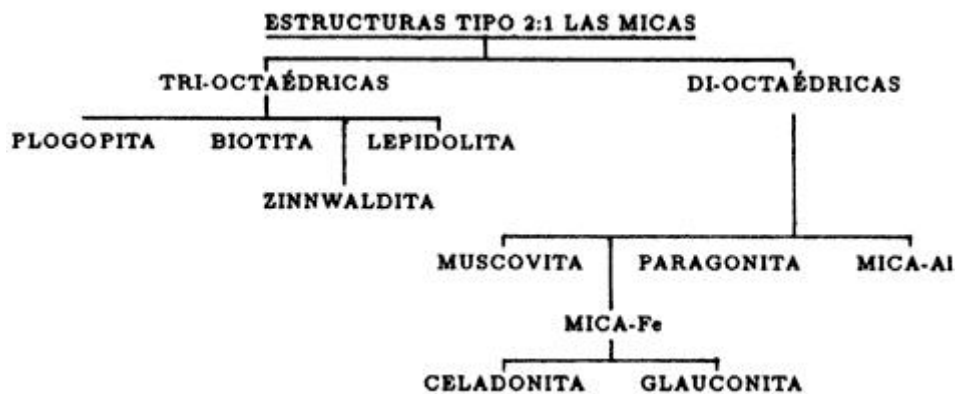


Figura 3.11: El árbol de las micas.

Es recordable la facilidad con la que la mica común se parte a lo largo de las hojas que la componen, pero resulta difícil partirla en la dirección perpendicular. Esto ilustra perfectamente la constitución laminar de tales minerales. Además, conociendo la estructura se puede explicar fácilmente por qué las micas son buenos aislantes térmicos, por ejemplo en las planchas eléctricas y en las conexiones: debido al espacio interlaminar, el cual no es un buen conductor térmico o eléctrico (las hojas se encuentran “desconectadas” unas de otras, lo que impide el paso del fluido térmico o eléctrico).

En contraste con la montmorillonita, la cual tiene una deficiencia de carga localizada en el centro de los octaedros, la carga residual de las micas está localizada en la hoja tetraédrica, es decir, en la superficie misma de las hojas, originando un amarre fuerte de los cationes interlaminares con las hojas, por lo que la estructura no es fácilmente expansible. Entre las micas más conocidas se encuentran la muscovita, cuyo nombre deriva del “vidrio de Moscú”, con el que se fabricaban antiguamente las ventanas de las casas de esa ciudad.

En resumen, las arcillas expansibles son las esmectitas, las vermiculitas y las haloisitas, que derivan esta propiedad de la concentración de carga interlaminar, por ejemplo

de 0.33 unidades por cada celda unitaria, mientras que ésta es igual a 0.86 en las vermiculitas y 1.0 en las muscovitas.

La figura 3.12 muestra los distintos espesores que se obtienen con las distintas arcillas al intercalarse una o dos capas de agua en el espacio interlaminar.

Una cosa queda clara: los edificios moleculares que constituyen a las arcillas y el grado de sustitución logrado, permiten obtener una serie de propiedades de interés en diversos campos de aplicación. No sólo esto es cierto cuando interviene la mano del hombre al tratar de modificar el espacio interlaminar (figura 3.12), sino que el proceso de modificación a través del intercambio con otras especies químicas ocurre naturalmente, lo que conduce a una variación constante de la naturaleza de la arcilla que se traduce en variaciones de la fertilidad del suelo, permeabilidad, etc. Estas modificaciones del edificio molecular son susceptibles de estudiarse experimentalmente en el laboratorio y para ello es necesario introducir, ya sea un catión, ya sea una especie química distinta, en el interior del espacio interlaminar.

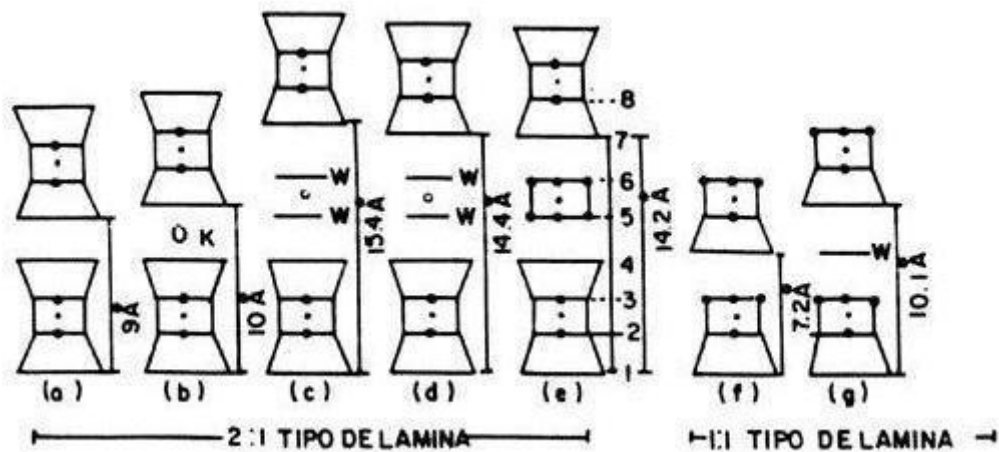


Figura 3.12: El espesor de las arcillas expandidas.

3.5. Espectrometría y Difracción de Rayos X

Los dos métodos ampliamente utilizados para la identificación y análisis de minerales son la Difracción de Rayos X (XRD) y la microscopía óptica.

Los minerales se identifican con exactitud con la XRD, ya que lo que determina es una serie de espaciados característicos de su estructura con unas intensidades definidas.

El análisis químico permite conocer los elementos constituyentes de un mineral y la proporción en que se encuentran. A partir de estos datos se puede establecer la fórmula del mineral, pero a veces la fórmula química calculada puede corresponder a más de un mineral; en general, este problema que se dará con minerales polimorfos o de composición química próxima, requiere el empleo de otras técnicas, como la XRD o la petrografía, para establecer correctamente la composición mineralógica.

La XRD constituye uno de los métodos más fiables de identificación mineralógica en todos aquellos materiales que presentan una estructura cristalina y por lo tanto ordenamiento interno de sus constituyentes. Esta técnica se basa en la interferencia de un haz de rayos X con la red cristalina. Las longitudes de onda empleadas son muy pequeñas (del orden de 1 Amstrong (Å)) y su valor depende del metal empleado para la generación de rayos X.

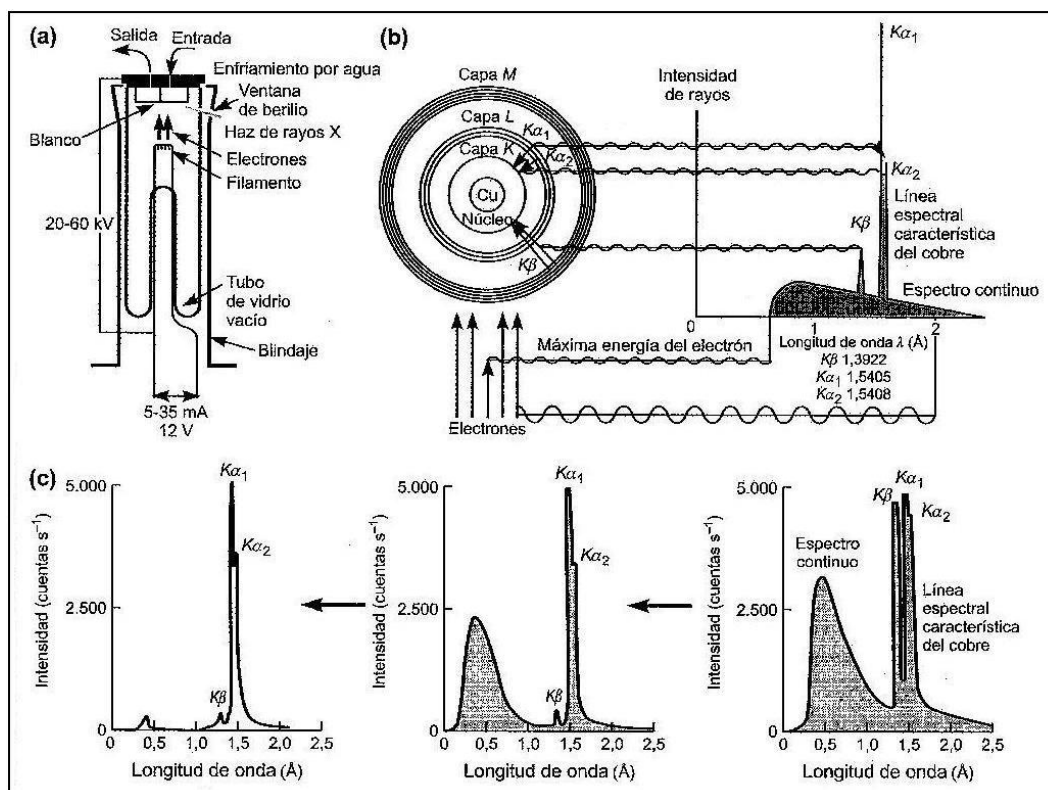


Figura 3.13: Difracción de Rayos X.

En la figura 3.13 se observa: (a) Tubo de Rayos X en sección mostrando sus diferentes partes. (b) La generación de Rayos X de la línea del espectro del Cu es debida a la transfe-

rencia de electrones dentro de la capa K , mientras que el espectro continuo es el resultado de las colisiones parciales o totales de los electrones. (c) El efecto de un filtro de Ni y de un analizador de altura de impulsos permite obtener una radiación prácticamente monocromática (Modificada de Tucker, 1988).

La interacción entre la materia cristalina y la radiación X da lugar a una dispersión (figura 3.14 - a). En esta dispersión, provocada por el ordenamiento interno de la materia cristalina, se producen interferencias, tanto constructivas como destructivas. Si dos rayos están desfasados media longitud de onda, darán lugar a una interferencia destructiva (líneas de trazos). Pero si los rayos están exactamente desfasados una longitud de onda, en la interferencia se refuerzan, originándose la difracción. Por lo tanto, un haz difractado está compuesto de rayos coherentemente dispersados (todos con la misma longitud de onda) que se refuerzan unos a otros.

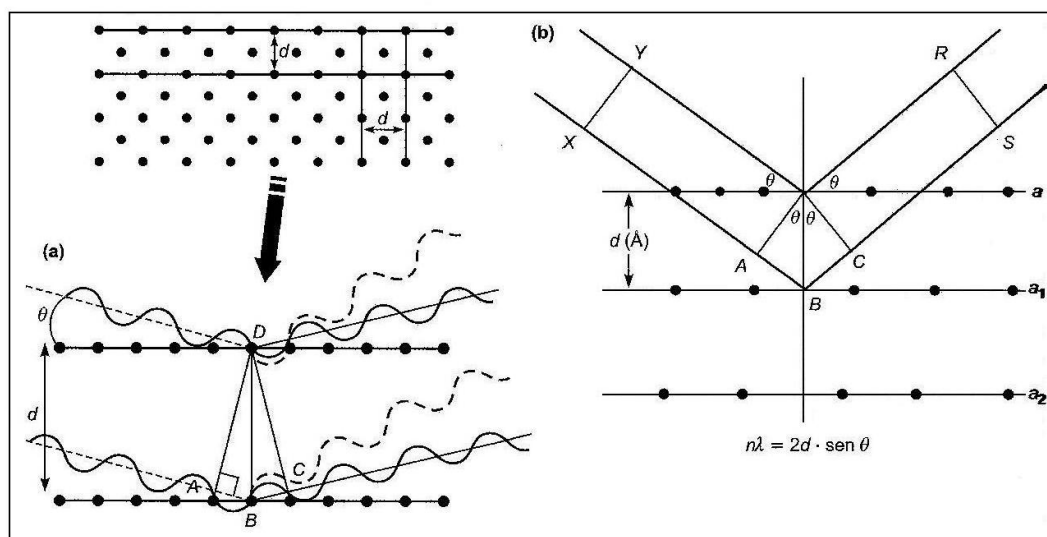


Figura 3.14: Interacción de los Rayos X con la materia cristalina.

La relación entre esta radiación y la estructura del cristal viene dada por la conocida ley de *BRAGG* que se expresa en la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta$$

Donde:

n = Número entero (orden de reflexión), generalmente se utiliza con valor 1.

λ = Longitud de onda de los rayos X (generalmente $CuK\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$).

d = Espaciado en amstrongs (\AA) entre planos reticulares paralelos.

θ = Ángulo de incidencia.

Los rayos X son difractados por el cristal sólo si se cumple que el ángulo de incidencia $\text{sen}\theta$ es igual a $n\lambda/2d$. Para todos los demás ángulos tienen lugar interferencias destructivas (figura 3.14 - b)

Sintetizando, un haz de rayos X que pasa a través de una partícula mineral es dispersado por los átomos que ordenadamente constituyen la materia cristalina. A determinados ángulos de incidencia los rayos X dispersados están en fase y originan un haz secundario intensificado. Este fenómeno de difracción podría asimilarse a una especie de reflexión de los rayos X por los planos de átomos. Los requisitos para que la difracción tenga lugar son los siguientes:

- El espaciado entre las capas de átomos debe ser aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la radiación. Las diferencias de fase dan como resultado interferencias que producen un cambio en la amplitud, pero no en la longitud de onda.
- Los centros de dispersión deben estar regularmente dispuestos.

En el estudio de los minerales el haz de rayos X se puede hacer incidir sobre un cristal (método del monocristal) o sobre la muestra pulverizada (método de polvo policristalino). El primero es poco operativo para la identificación de minerales o de muestras con varios minerales. En el método del polvo policristalino, al estar la muestra desorientada, permite disponer de un gran número de familias de planos reticulares que pueden difractar, facilitando por tanto la identificación. En el estudio de monocristales es frecuente el empleo de imágenes fotográficas, mientras que el resultado del análisis de la muestra policristalina se recoge en un difractograma (figura 3.16 - b).

En la práctica, la muestra es finamente molida a tamaño fino ($< 50 \mu m$), se coloca en un portamuestra y se introduce en el difractómetro de rayos X, donde la muestra se somete a la acción de la radiación X que incide en forma continua con distintos ángulos (figura 3.15).

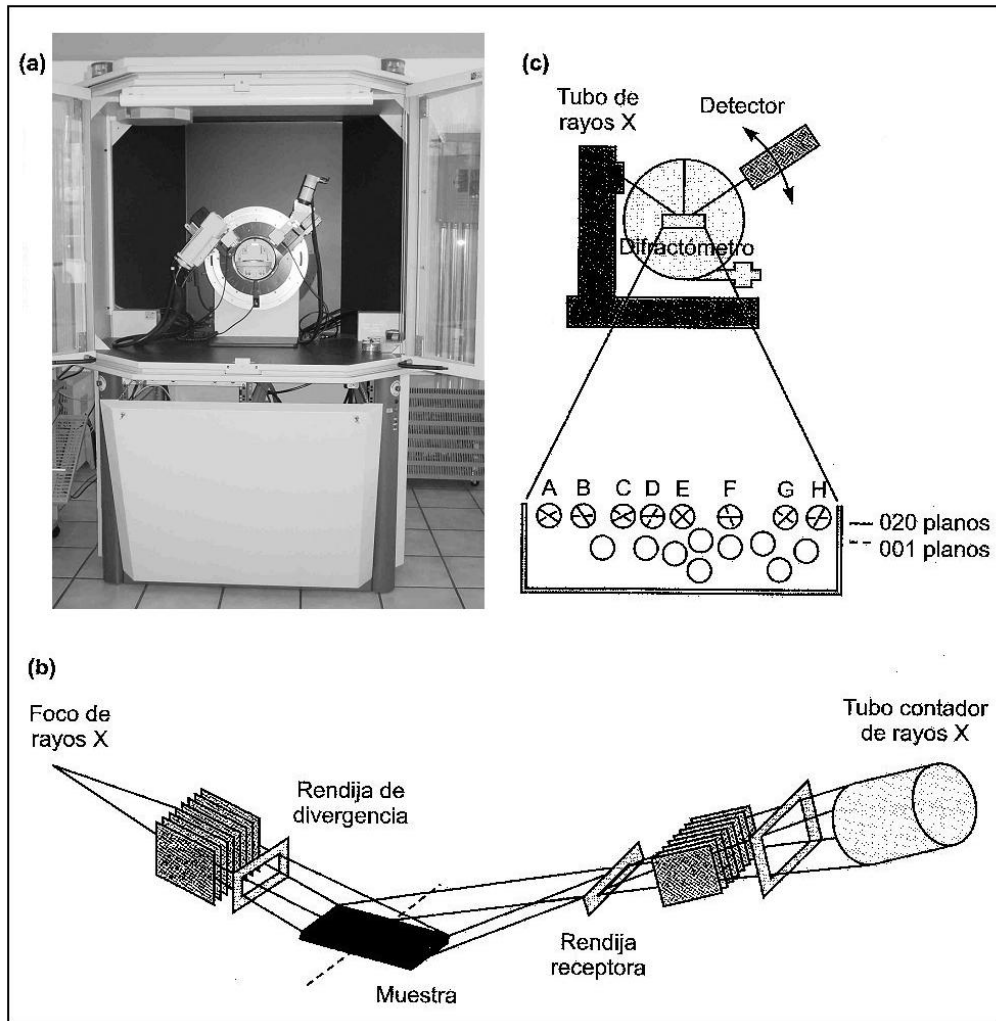


Figura 3.15: Difractómetro de Rayos X.

En el difractograma (figura 3.16 - b) se recogen una serie de picos que en la escala horizontal muestran el ángulo 2θ y en la vertical la intensidad del pico difractado. Conociendo la longitud de onda (λ) de los rayos X y el valor del ángulo de difracción (θ) medido como 2θ en el difractograma, se calcula el valor del espaciado (d) mediante la ecuación de Bragg.

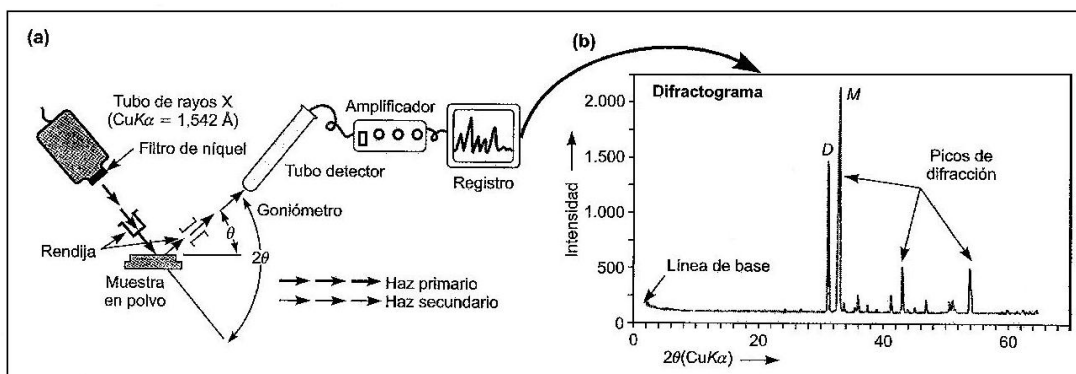


Figura 3.16: Esquema general de los principales componentes de un difractómetro y del resultado obtenido.

Además de la identificación de las fases cristalinas presentes, se puede determinar su proporción mediante el empleo de poderes reflectantes, valores característicos del mineral considerado que se aplican a los valores de intensidad (altura o área) de los picos de mayor intensidad de los minerales identificados (figura 3.17).

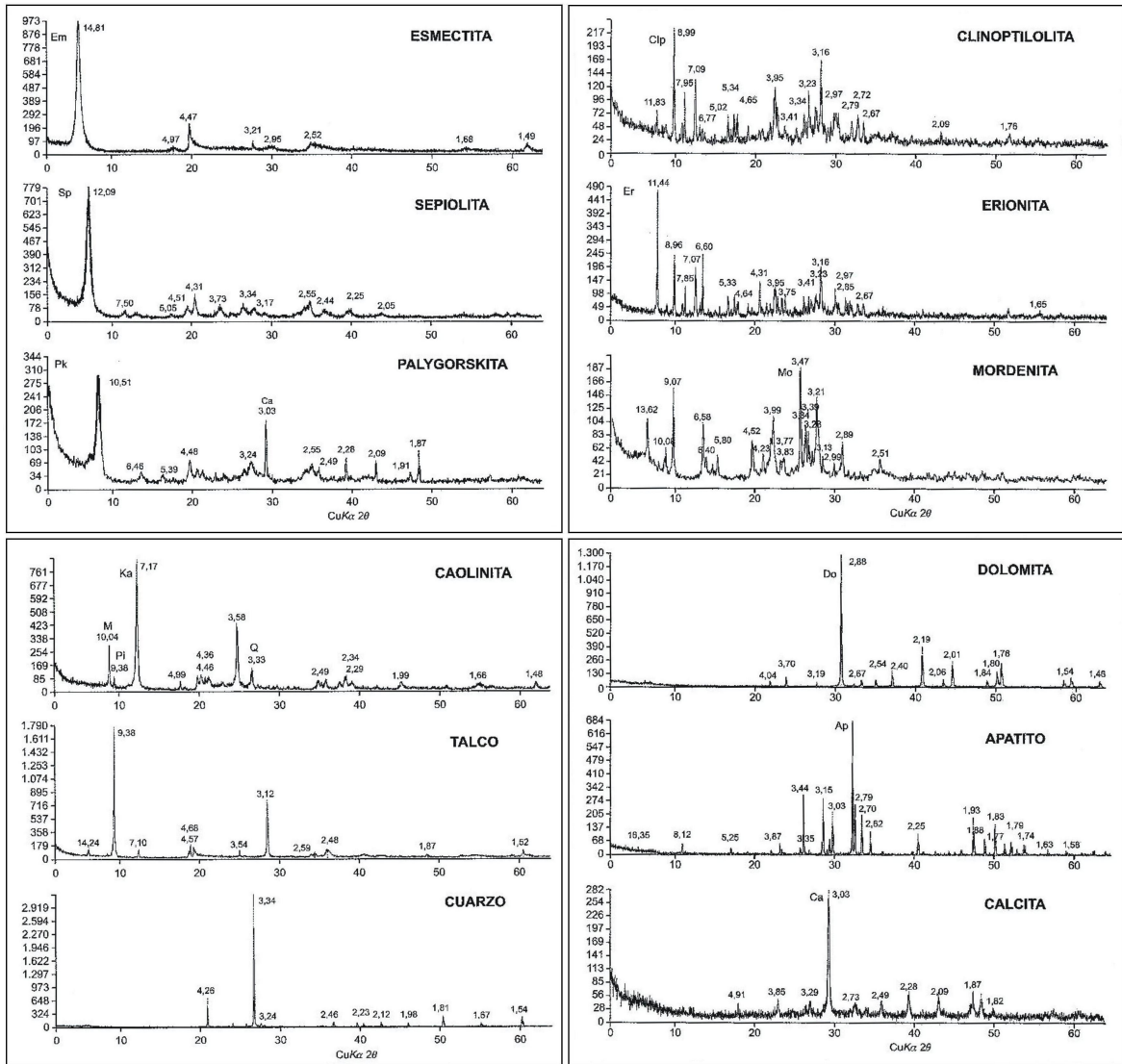


Figura 3.17: Difractogramas de algunos minerales.

3.6. Absorción y Adsorción

Se denomina adsorción a la adhesión de un soluto (sorbato) a las superficies externas de un sólido (sorbente) o de forma más general a la acumulación de solutos en la proximidad de una interfase sólido-solución.

El término absorción se emplea en minerales de la arcilla con espacio interlaminar (esmeclitas) o con canales que pueden acoger, en el interior de su estructura, cationes hidratados y otras moléculas. Estos minerales con superficies externas e internas presentarán tanto adsorción como absorción. La absorción depende de la densidad, viscosidad y tensión superficial del líquido empleado, mientras que la adsorción está más influenciada por el tamaño, la forma y la polaridad de las moléculas implicadas.

Algunas bentonitas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales.

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100 % con respecto al peso.

Propiedades Índices y Mecánicas

4.1. Peso Específico y Peso unitario

El peso específico relativo de los sólidos, es un número que expresa la relación entre su peso y el peso de un volumen igual de agua a 4°C. Así, el cuarzo (peso específico de 2,65) es 2,65 veces más pesado que un volumen igual de agua.

El peso específico se puede estimar de forma relativa, el más común es el método del picnómetro. La mayoría de los minerales metálicos tienen mayor peso específico que los no metálicos. Resultados de la bentonita de Socos, se muestra a continuación los realizados en el laboratorio del INGEMMET con los siguientes valores:

	M1	M2	M3
Gs(Gravedad específica relativa de los sólidos)	2.29	2.28	2.17

Tabla 4.1: Tabla de Pesos Específicos.

Que son valores propios de las arcillas comunes con predominio de los silicatos como minerales predominantes. El peso unitario en su estado natural, es la relación del peso entre el volumen y teniendo en cuenta la humedad natural, se han efectuado ensayos en tres calicatas a profundidades de 1.0 a 1.3 m y los resultados son:

	Ca-1	Ca-2	Ca-3	Ca-4	Ca-5
P. Unitario Húmedo (g/cm^3)	1.75	1.73	1.74	1.72	1.67
Humedad Natural (%)	29	32	30	28	26
P. Unitario Seco (g/cm^3)	1.36	1.31	1.34	1.34	1.33

Tabla 4.2: Tabla de Pesos Unitarios.

Ensayos realizados con el cono de arena en cada calicata.

4.2. Límites de Consistencia o de Atterberg

Los Límites de Atterberg miden el comportamiento de una arcilla en contacto con el agua, estando fuertemente influenciado por otros factores como el tamaño y forma de partículas y la porosidad.

El agua forma una envoltura sobre las partículas laminares y produce un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. A nivel estructural este comportamiento se justifica por la existencia de enlaces electrostáticos débiles entre las partículas arcillosas, las moléculas de agua y los cationes adsorbidos o en la disolución intersticial.

A medida que el material se seca y en función de la cantidad de agua disponible, la consistencia del material cambia. Una falta de agua provocará una menor movilidad de los enlaces, que se hacen más estables; esto es, el material pierde plasticidad, hasta llegar finalmente a la rotura de la pasta arcillosa. Si por el contrario, la cantidad de agua aumenta, el distanciamiento de las partículas provoca una pérdida de la cohesión y la pasta se comporta como un líquido más o menos viscoso, según la cantidad de agua presente.

Los valores del Límite Líquido e Índice de Plasticidad, son llevados a la carta de plasticidad de A. Casagrande y se sitúan en campos distintos observándose valores de plasticidades muy altas en las bentonitas de Socos realizadas de las calicatas muestreadas (ver tabla 4.3)

Muestra	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IF (%)
Ca-01	153.4	50.7	44.0	102.7	-0.213
Ca-02	152.8	51.2	43.4	101.7	-0.186
Ca-03	151.5	50.5	42.7	101.0	-0.208

Tabla 4.3: Límites de Atterberg.

Donde:

LL = Límite Líquido.

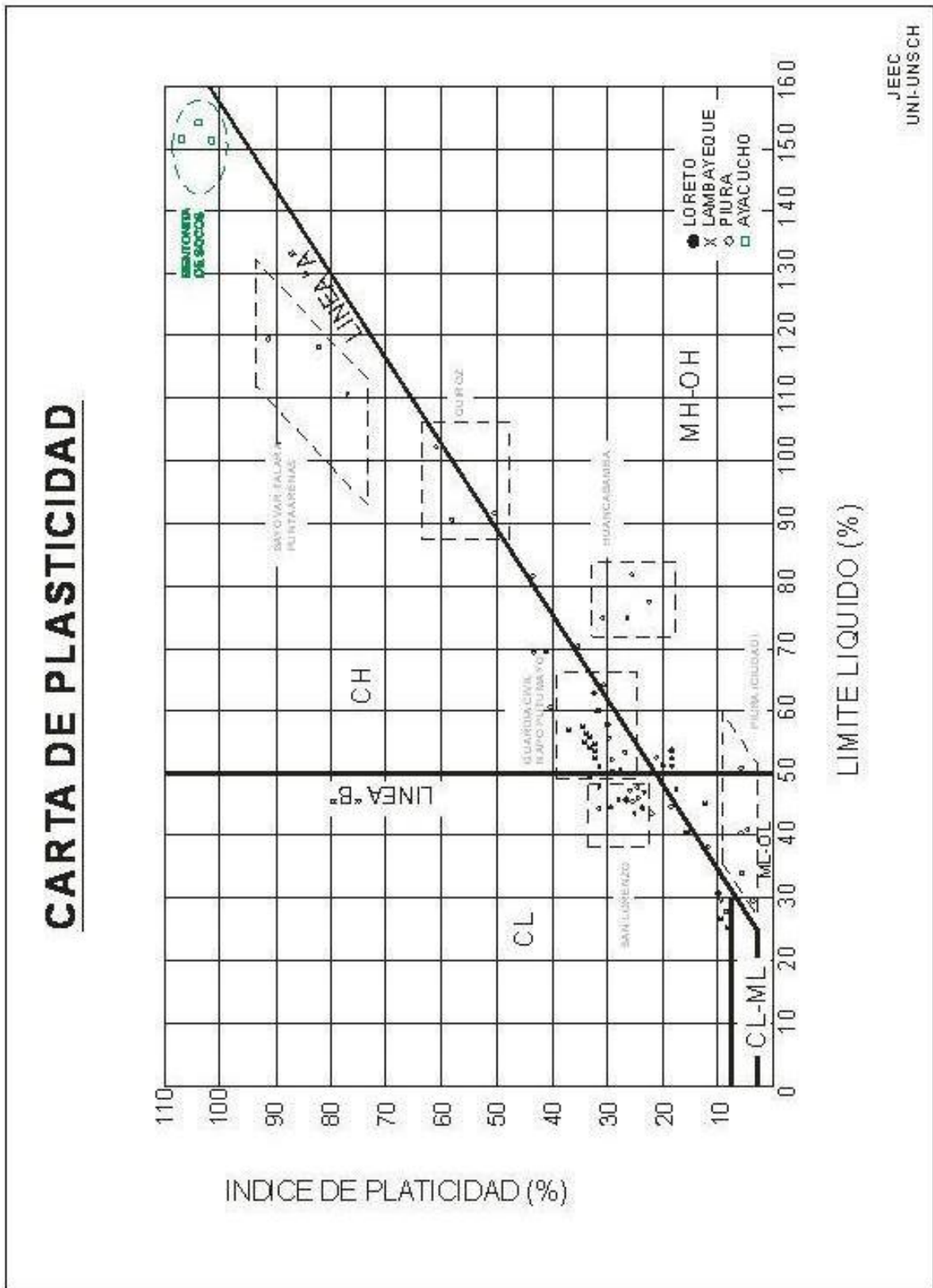
LP=Límite Plástico.

LC=Límite de Contracción.

IP=Índice de Plasticidad.

IF=Índice de Fluidez

Se puede observar que los Límites Líquidos son $LL > 150\%$ y los Índices de Plasticidad son $IP > 100\%$ por lo que presentan una plasticidad excesiva para su manipulación y se sitúan en la carta de plasticidad de Atterberg en la zona de arcillas de alta plasticidad (CH).



JEEC
UNI-UNSCH

Figura 4.1: Carta de Plasticidad.

El Índice de Fluidez con valores $IF < 0$ indica que las arcillas se encuentran en el estado sólido en su estado natural con su humedad natural.

Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de arcilla, incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En illita y caolinita, el tipo de catión adsorbido Na^+ ó Ca^{+2} es de escasa influencia en el límite plástico de estos minerales, aunque el límite líquido aumenta, específicamente en la illita. Sin embargo el intercambio de Ca^{+2} por Na^+ en la esmectita provoca una ligera disminución del límite plástico, pero un incremento considerable del límite líquido, que llega hasta un 700 %, como resultado de la deslaminación de los cristales de esmectita en presencia de sodio. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfectas su estructura, más plástico es el material.

4.3. Curva Granulométrica

La textura limo-arcillosa de las muestras obtenidas de las calicatas en mención, determina que la clasificación mecánica convencional (tamizado) no sea aplicable, por lo que se adopta realizar el análisis granulométrico por sedimentación (ASTM-D422) con el hidrómetro de mediciones en agua más defloculante.

Los resultados reflejan un predominio de las arcillas y coloides y un mínimo de arenas y limos, ya que son muestras naturales que se encuentran contaminados con un material amorfo. En la tabla 5.5 se muestran los resultados.

	Ca-01	Ca-02	Ca-03
Limos (%)	12.0	11.5	10.7
Arcillas y Coloides (%)	88.0	88.5	89.3
< malla#200 (%)	88.00	88.5	89.3
LL (%)	153.4	152.8	151.1
LP (%)	50.6	51.5	50.3
IP (%)	102.8	101.3	100.8
LC (%)	44	43.4	42.7
SUCS (%)	CH	CH	CH
Color (%)	blanquecino	blanquecino	blanquecino

Tabla 4.4: Clasificación Granulométrica.

El término de las arcillas implica el predominio de los tamaños de partículas inferiores a $2 \mu m$ de diámetro esférico aparente; es decir, tienen tamaños que pueden incluirse en una esfera de $2 \mu m$ de diámetro. Generalmente los tamaños son incluso inferiores a $1 \mu m$, dependiendo de su composición y estructura, observándose, desde el punto de vista mineralógico, los mayores tamaños en minerales del grupo de las caolinitas y los menores en el grupo de las esmectitas. De hecho en el caso de las esmectitas los tamaños (valor medio $0.5 \mu m$) están predominantemente dentro del rango de los coloides (entre $0.001 \mu m$ y $1 \mu m$).

Según su distribución, los minerales de las arcillas pueden presentar tres tipos principales de morfología:

- **Escamas:** Similar dimensión en dos direcciones y la tercera de muy pequeño grosor.
- **Listones:** La anchura es mayor en una dirección y mucho menor en la otra, siendo el grosor siempre mucho menor que las dos anteriores.
- **Fibras:** Dos dimensiones son muy similares, pero la tercera es mucho mayor.

En los medios naturales (suelos, sedimentos) los agregados arcillosos presentan con frecuencia micro-fábricas abiertas (tipo panal de abeja) o cerradas (laminar y turbulenta) dependiendo de su ambiente de formación y posterior evolución. Dentro de estas micro-fábricas y a diferente nivel estructural es posible diferenciar tres tipos de porosidad:

- **Poros ínter cristalino:** Se desarrollan en el interior de las láminas estructurales, tienen tamaños entre 5 a 10 Å y se denominan micro poros.
- **Poros ínter partícula:** Representan los espacios entre las partículas primarias, tienen tamaños entre 10 a 500 Å y se denominan meso poros.
- **Poros ínter agregados:** Son los espacios entre agregados que presentan tamaños superiores a 500 Å y se denominan macro poros.

Los poros ínter cristalinos son prácticamente exclusivos de las esmectitas y de los minerales fibrosos.

4.4. Coeficiente de Permeabilidad (k)

Se define como el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria de material perpendicular al flujo y bajo un gradiente piezométrico unitario y se mide en m/s .

La conductividad hidráulica relaciona la permeabilidad intrínseca con el peso específico del fluido y la viscosidad dinámica del fluido.

Los materiales pueden clasificarse según su coeficiente de conductividad hidráulica de muy permeables a muy impermeables, según los rangos siguientes:

Grado de Permeabilidad	Valor de $k(m/s)$
Muy Impermeable	$< 10^{-9}$
Impermeable	10^{-9} a 10^{-5}
Permeable	10^{-5} a 10^{-2}
Muy Permeable	$> 10^{-2}$

Tabla 4.5: Tabla de Rangos de Coeficientes de Conductividad Hidráulica.

Dado que la conductividad hidráulica depende de las características texturales del material atravesado, resulta evidente que la porosidad y el tamaño de sus partículas serán, junto con el tipo de micro-fábrica responsable de los resultados obtenidos. En el caso de las arcillas, las micro-fábricas en panal de abeja con disposición cara-borde son las que presentan una porosidad más alta, mientras que las micro-fábricas laminares con disposición cara-cara muestran la porosidad más baja. El tipo de micro-fábrica está más relacionado con las condiciones de formación de la arcilla que con el tipo de mineral de la arcilla.

La influencia de los cationes intercambiables es notoria en el caso de las esmectitas, habiéndose observado que la esmectita cálcica tiene mayor conductividad hidráulica que la esmectita sódica.

El ensayo realizado con la muestra de la Bentonita de Socos, fue del tipo en Pared Flexible con el 95 % de la MDS y el COH aproximado del terreno natural, se obtuvo el valor de la conductividad hidráulica de $k = 4.56 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ relativamente impermeable, según la tabla 4.5 de rangos de coeficientes de conductividad hidráulica.

4.5. Expansión Libre y Expansión Controlada

Expansión es el aumento del volumen del suelo debido al flujo del agua por el cambio de la carga hidráulica a causa de las presiones intersticiales negativas. Es el comportamiento de los suelos como resultado de cambios en el equilibrio de sus componentes mecánicos y fisicoquímicos. Los suelos expansivos se caracterizan por tener el siguiente comportamiento mecánico:

- Contracción de la arcilla debido al secado.
- Expansión de la arcilla al humedecerse.
- Desarrollo de presiones cuando está confinada y no puede expandirse.
- Disminución de la resistencia al corte y de la capacidad de soporte al expandirse.

Los suelos expansivos son definidos como los suelos arcillosos que se expanden de acuerdo a la variación de su contenido de humedad. Los componentes principales que se caracterizan por expandirse mediante el proceso de hidratación son las esmectitas y principalmente las montmorillonitas.

La bentonita de Socos es una arcilla expansiva, se evaluará su potencial de expansión de acuerdo a métodos estándar e identificación visual, en la que se observa in situ grietas o rajaduras, debido al fenómeno de palpitación que sufre la superficie de estos suelos cuando varía su humedad.

La composición mineralógica, tiene influencia en el potencial de su hinchamiento, la carga eléctrica negativa de la superficie de los minerales, la fuerza de enlace entre ellos y la capacidad de intercambio catiónico contribuyen en la expansión de las arcillas. La capacidad de absorción de agua de algunos minerales, como la montmorillonita, es otro factor determinante en el potencial de expansión. El método de difracción de rayos X complementado con el ensayo de microscopía electrónica de barrido y el análisis químico con fines de investigación son los más recomendados.

Métodos indirectos basados en los ensayos de Límites de Atterberg, el contenido coloidal, cambio de volumen potencial (PVC), actividad por tamaño de arcilla, etc., correlacionan el potencial de expansión a partir de estos índices, como muestran las siguientes tablas:

Índice de Plasticidad	Potencial de Hinchamiento
0 - 15	bajo
10 - 35	medio
20 - 55	alto
35 ó más	muy alto

Tabla 4.6: Relación entre el Potencial de Hinchamiento y el Índice de Plasticidad Seed, Woodward y Ludgren (1962)

Límite de Contracción	Contracción Lineal	Grado de Expansión
< 10	< 8	crítico
10 - 12	5 - 8	marginal
> 12	0 - 5	no crítico

Tabla 4.7: Potencial Expansivo. Altemeyer (1965)

Método de actividad, propuesto por Seed, Woodward y Ludgren (1962) figura 4.3

$$Actividad = \frac{IP}{(c - 10)}$$

Donde: IP = Índice de Plasticidad

c = % de tamaño de partícula menor de 0.002 mm

Medida de cambio potencial de volumen (PVC); desarrollado por Lambe (1960), en muestras remoldadas se ensayan en el anillo de consolidación con esfuerzos de compactación de 55,000 lb/pie² bajo una presión inicial de 220 lb/pie², añadiéndose agua y midiéndose la presión de expansión, ésta es designada como índice de hinchamiento. De la figura 4.2 el índice de hinchamiento puede ser convertido a cambio potencial de volumen. Lambe (1960) estableció las categorías de PVC (tabla 4.8)

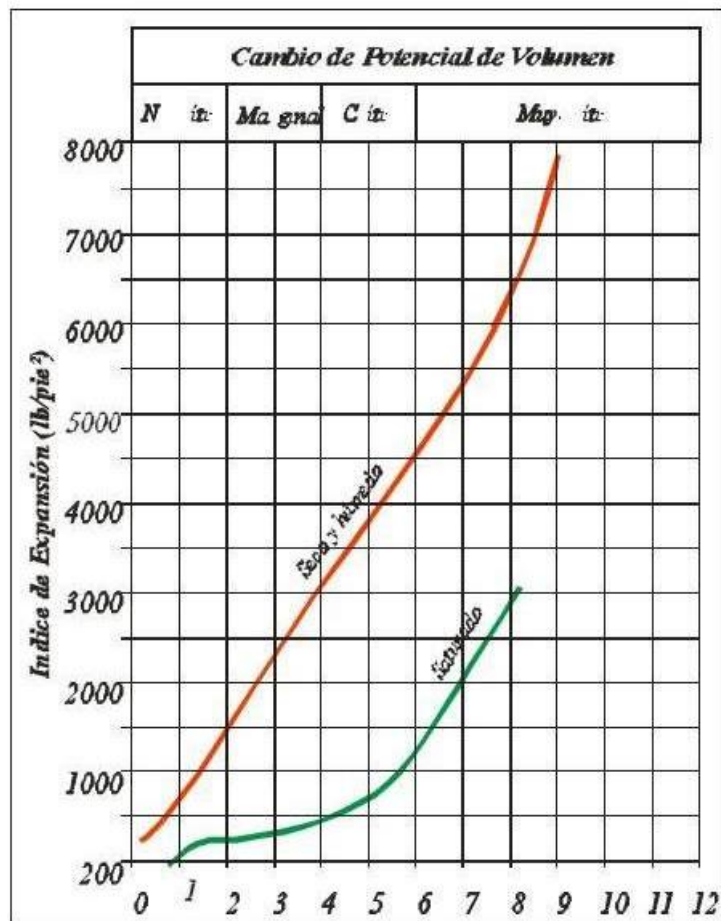


Figura 4.2: Cambio Potencial de Volumen, Lambe1960.

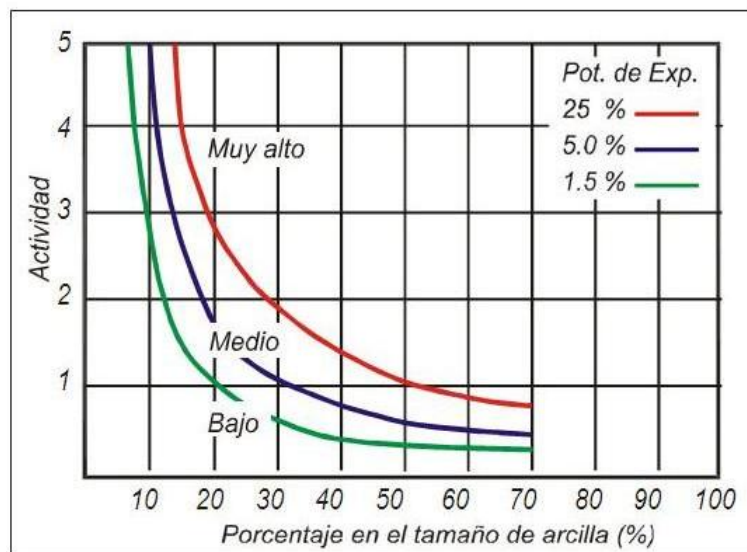


Figura 4.3: Actividad, Seed Woodward y Ludgren, 1962.

Grado de PVC	Categoría
< 2	no crítico
2 - 4	marginal
4 - 6	crítico
> 6	muy crítico

Tabla 4.8: Cambio Potencial de Volumen (PVC). Lambe, 1960

Parámetro	Nula	Marginal	Crítica	Muy Crítica
Límite Líquido (LL)	< 30	30 - 40	40 - 60	> 60
Índice de Plasticidad	0 - 15	10 - 35	20 - 55	> 45
% < 1 μm	< 15	13 - 23	23 - 30	> 28
% < 0.074 μm	< 30	30 - 60	60 - 95	> 90
PVC de Lambe	< 2	2 - 4	4 - 6	> 6
Índice de Deseccación	> 1	0.8 - 1	0.6 - 0.8	< 0.6

Tabla 4.9: Criterios de Peligrosidad (Jiménez Salas)

Contenido Coloidal % < 0.001 mm	IP (%)	LC (%)	Expansión	Grado de Expansión
> 28	> 35	> 11	> 30	Muy alto
20 - 13	21 - 41	7 - 12	20 - 30	Alto
13 - 23	15 - 28	10 - 16	10 - 30	Medio
< 15	< 18	< 15	< 10	Bajo

Tabla 4.10: Estimación de los Cambios de Volumen en Suelos Expansivos. Holtz y Gibbs, 1965

% < #200	LL (%)	SPT	Expansión Probable (%)	Presión de Hinchamiento	Grado de Expansión
> 95	> 60	> 30	> 10	> 10	Muy alto
60 - 95	40 - 60	20 - 30	3 - 10	2.5 - 10	Alto
30 - 60	30 - 40	10 - 20	1 - 5	1.5 - 2.5	Medio
< 30	< 30	< 10	< 1	< 0.5	Bajo

Tabla 4.11: Criterios de Expansividad. Chen, 1975

De los métodos indirectos se puede concluir que la bentonita de Socos se considere como un suelo potencialmente expansivo correlacionando los límites de consistencia y el porcentaje coloidal en la que para corroborarlo se realizó el ensayo de Expansión libre en el Laboratorio que es el método más certero recomendable.

Este ensayo se basa en la norma ASTM D4546 que puede ser usado para determinar la magnitud de expansión o asentamiento bajo una presión vertical conocida o determinar la magnitud de presión vertical necesario para mantener el volumen o altura constante.

El resultado del ensayo de Expansión Libre fue de un valor de 39.68% que indica un comportamiento de la arcilla de Socos como un suelo expansivo a tener en cuenta para su uso como material de construcción.

4.6. Consolidación Unidimensional

Se define la consolidación de un suelo, como el proceso de disipación de excesos de presiones de poros o intersticiales del mismo, generado por una aplicación de carga.

En muestra remoldeada de la bentonita de Socos a densidad apropiada, se hizo el ensayo normalizado de consolidación unidimensional, cercano a su estado natural de sitio.

De los resultados del ensayo se obtuvo la curva de consolidación en la que el valor del Índice de compresión es de $C_c = 0.528$ que corresponde a suelos con una compresibilidad alta a media.

El valor del Índice de recompresión $C_r = 0.300$ y el del Índice de Expansión $C_s = 0.166$ inducen a definir que el suelo es una arcilla normalmente consolidada, evaluando su historia tensional en la curva edométrica con correcciones y por el método de Casagrande (1936), se obtienen valores de la preconsolidación de aproximadamente de 1.80 Kg/cm^2 , valores bajos e inferiores a los que ha tenido en su historial geológico que soportaron estos materiales.

Tal vez las causas de estos valores sean debidos a los procesos de desecación y/o formación de costras carbonatadas que enmascaran la verdadera historia tensional de estos suelos, haciendo muy difícil estimar por medio de curvas edométricas su verdadero valor de preconsolidación.

Pese a todo, la morfología de la curva edométrica de pendiente pronunciada de un inicio y más fuerte aún a partir de una presión de 1.80 Kg/cm^2 , permiten situar la frontera entre las tensiones que provocan asentamientos importantes y las que no en 1.80 Kg/cm^2 .

4.7. Resistencia al Esfuerzo Cortante

Se realizaron ensayos de Corte directo tipo CD (Consolidado Drenado), obteniendo de este modo los parámetros efectivos. Para su ejecución se remoldeó muestras procedentes del muestreo de las calicatas $Ca - 01$ y $Ca - 03$ en la que se seleccionó una velocidad de corte de 0.001 mm/min .

El espécimen se preparó con un contenido de humedad de $w(\%) = 20.4$ y a una densidad húmeda de $\gamma_h = 1.919 \text{ gr/cc}$ y una densidad seca de $\gamma_d = 1.594 \text{ gr/cc}$ en los tres casos y a esfuerzos normal de 0.50, 1.00 y 1.50 Kg/cm^2 , alcanzando esfuerzos de corte máximo de 0.315, 0.490 y 0.564 Kg/cm^2 , respectivamente.

El ángulo de fricción interna máximo alcanzó un valor de $\phi = 14^\circ$ y la cohesión el valor de $c = 0,21Kg/cm^2$ que corresponde a un material constituido por partículas sueltas no cementadas con gran porcentaje de arcillas como material cohesivas y algo de arenas como material friccionante.

Asimismo, se realizó un ensayo de corte triaxial no consolidado - no drenado (UU) especial para este tipo de material, con una densidad húmeda de $\gamma_h = 1,498gr/cc$ y contenido de humedad de $w(\%) = 34$ y densidad seca de $\gamma_d = 1.118gr/cc$.

Considerando esfuerzos totales se logró alcanzar los parámetros mecánicos del ángulo de fricción interna de $\phi = 13,86^\circ$ y la cohesión de $c = 0,67Kg/cm^2$.

Si se comparan los dos ensayos de corte el ángulo de fricción interna son casi iguales, mas no el valor de la cohesión, esto es debido a las diferentes condiciones físicas del ensayo.

	$\phi(^\circ)$	$c (Kg/cm^2)$
Corte Directo (CD)	14°	0.21
Ensayo Triaxial (UU)	13.8°	0.67

Tabla 4.12: Parámetros de Corte

Como es la muestra un suelo cohesivo (CH), se procedió a realizar un ensayo de Resistencia a Compresión no confinada, de modo que se obtuvo como resultado una resistencia de carga última de $qu = 59,28KPa = 0,593Kg/cm^2$ y como en suelos arcillosos la cohesión es igual a $c = qu/2 = 0,593/2 = 0,30Kg/cm^2$, esto es con una muestra remoldeada a una densidad húmeda de $\gamma_h = 1,48gr/cm^3$ y contenido de humedad de $w(\%) = 32,39$ y densidad seca de $\gamma_d = 1,12gr/cm^3$.

4.8. Compactación y CBR

Para verificar el comportamiento frente a la compactación de la bentonita de Socos, se ha procedido a realizar el ensayo del Proctor Estándar y el Proctor Modificado de las muestras de cada calicata en estudio y adicionalmente el ensayo C.B.R.

De las curvas de compactación resultante, se puede observar que para distintos contenidos de humedad es posible encontrar una densidad seca máxima que es la óptima para una energía de compactación ya sea del Proctor Estándar y/o Modificado.

Los valores correspondientes del Contenido Óptimo de Humedad (COH) y la máxima densidad seca (MDS) se muestran en la tabla 4.13

		<i>Ca - 01</i>	<i>Ca - 02</i>	<i>Ca - 03</i>
Proctor Estándar	MDS (<i>gr/cc</i>)	1.128	1.142	1.131
	COH (%)	40.3	38.3	39.3
Proctor Modificado	MDS (<i>gr/cc</i>)	1.396	1.374	1.378
	COH (%)	27.9	30.8	29.8

Tabla 4.13: Resultados de Compactación

C.B.R.	(100 % <i>MDS</i>)	4.0 %
	(95 % <i>MDS</i>)	3.0 %

Dichos valores corresponden a suelos blandos arcillosos, que al saturarse pierden consistencia y dureza, lo que al emplearse como material de préstamo deberá de adecuarse con suelos adicionales de mejores propiedades ingenieriles dependiendo del uso a emplear.

Se presenta la tabla 4.14 como un resumen general de los distintos tipos de ensayos realizados para determinar las propiedades mecánicas de la Bentonita de Socos, como una fase inicial para los innumerables usos de dicho material como material de construcción en la Ingeniería Civil.

N° de pozo a cielo abierto	Ca – 01	Ca – 02	Ca – 03
Profundidad	1.2	1.5	1.3
	Arcilla blanca	Arcilla blanca	Arcilla blanca
Mineralogía (DRX)			
Montmorillonita (%)	24.49	36.09	26.04
Cristobalita (%)	27.68	26.84	28.38
Albita (%)	14.29	6.77	17.01
Amorfo (%)	29.59	27.72	27.21
Otros (%)	3.77	2.99	1.36
Granulometría)			
% que pasa la malla N° 40 (0.42mm)	100	100	100
% que pasa la malla N° 200 (0.075mm)	88	88.5	89.3
% de partículas menor a 0.0011mm	74.73	73.72	76.34
Límites de Consistencia			
Límite Líquido %(LL)	153.4	152.8	151.8
Límite Plástico %(LP)	50.7	51.23	50.5
Índice Plástico %(IP)	102.7	101.7	101.0
Límite de Contracción %(LC)	44.0	43.4	42.7
Índice de Fluidez %(IF)	-0.213	-0.186	-0.208
Expansión Libre (%)	39.68	-	-
Clasificación S.U.C.S.	CH	CH	CH
Pruebas de Resistencia			
Compresión Simple (c_u) (Kg/cm^2)	0.30	-	-
Ángulo de Fricción Interna (°) CD/TX	14/13.8	-	-
Cohesión (Kg/cm^2) CD/TX	0.21/0.67	-	-
Coefficiente de Permeabilidad (k) (cm/s)	4.56×10^{-5}	-	-
Pruebas de Compactación			
Proctor Estándar (MDS gg/cc - COH %)	1.128/40.3	1.142/38.3	1.131/39.3
Proctor Modificado (MDS gg/cc - COH %)	1.396/27.9	1.374/30.8	1.378/29.8
Ensayos de Consolidación			
Índice de Consolidación (Cc)	0.528	-	-
Índice de Recompresión (Cr)	0.300	-	-
Índice de Expansión (Cs)	0.166	-	-
Relaciones Gravimétricas			
Peso Volumétrico del lugar (Kg/m^3)	1750	1730	1740
Contenido de Humedad (%)	29	32	30
Gravedad Específica de los Sólidos (Gs)	2.29	2.28	2.17
Relación de vacíos (e)	1.326	1.326	0.93
Porosidad %(n)	57	57	57
Grado de Saturación %(Sr)	50	55	49

Tabla 4.14: Resumen de Ensayos de Laboratorio

4.9. Evaluación Tixotrópica

La tixotropía es definida como una transformación sensible de *gel-sol-gel* en ciertos materiales producidos por perturbaciones dinámicas seguidas de un período de reposo. Así la palabra TIXOTROPÍA consta de 2 palabras que etimológicamente significan:

THISIS: Tocar, sacudir

TROPO: Cambiar, volver

Luego, la TIXOTROPÍA significa, el cambio por movimiento vibratorio y sacudimiento. Esta propiedad de la tixotropía es poseída por algunas arcillas o suelos arenosos con algún contenido de arcilla.

Recientemente (Schmertmann, 1991), dice que la tixotropía y la mecánica de suelos ocurren simultáneamente y que tienen similares efectos cualitativos en el tiempo. La tixotropía domina completamente en suelos arcillosos con alto índice de vacíos y muy bajas condiciones de esfuerzo efectivo.

La “tixotropía” originalmente fue introducido por Freundlich y Peterfi para describir la transformación isothermal reversible *gel-sol-gel*, que puede ser producida en algunos materiales por trabajo mecánico seguido por un periodo de reposo, este calificativo fue después ampliado para incluir sistemas similares de otro modo en los que el estado del material en reposo no es necesariamente parecido al gel. Los métodos electrónicos de medición han demostrado que el espacio de tiempo requerido para que la estructura original sea restablecida puede ser muy corto en verdad y entonces se vuelve difícil distinguir entre un material tixotrópico con un tiempo de recuperación muy corto y un material cuya viscosidad disminuye conforme la velocidad de corte y depende para todos los propósitos prácticos solamente la velocidad instantánea de corte.

Los siguientes comentarios fueron tomados del libro de Mecánica de Suelos (A. Jumikis) en donde se dice que Hvorslev explica que la presencia de coloides en el suelo tiene un efecto considerable en las propiedades de ese suelo. Así, en su tesis del Dr. Hvorslev explica que algo de la resistencia estructural que el material arcilloso ha perdido por remoldeo, se recupera con el tiempo en forma lenta. Esta recuperación de resistencia es llamada por Hvorslev recuperación tixotrópica. El tiempo necesario para la recuperación de la resistencia depende del contenido de humedad y particularmente de las sales en solución en el agua del suelo. Por definición tixotrópica de un material que sufre una transformación isoterma *gel-sol-gel* por medio de agitación y reposo posterior. Entonces por agitación mecánica se licúa un gel, y se

resolidifica cuando cesa la agitación. Este proceso de transformación del gel a sol puede ser repetido indefinidamente sin ninguna fatiga. El tiempo de platinización bajo condiciones externas similares es el mismo. En vez de agitación mecánica, un gel puede ser transformado en sol nuevamente se revierte a gel. La transformación de gel a sol bajo la aplicación de energía mecánica puede producirse sin la aplicación de calor externo. Si el cambio por calentamiento es reversible por calentamiento, se dice que el gel es totalmente reversible, Brayne y Ritcher informaron que el valor final de gelatinización no depende prácticamente de la temperatura de gelatinización misma (entre 20 °C y 40 °C). Walotowitch y Tostoi han demostrado asimismo que los límites de flujo de suspensiones concentradas de caolín son independientes de temperaturas entre 10 °C y 57 °C. Esencialmente el cambio de sol a gel es el cambio de consistencia de suspensiones coloidales: bajo agitación, los soles pierden su consistencia y viscosidad; después de permitir separar las suspensiones agitadas, los soles vuelven a adquirir sus consistencias originales. La pérdida de consistencia es causada por un rompimiento temporal en la estructura de la materia tixotrópica. De aquí que el fenómeno tixotrópico es el cambio de estado de gel a sol reversible e isothermal que se produce en algunas materias coloidales en suspensiones cuando se agitan, por ejemplo, cuando están sujetas a esfuerzos constantes.

Existen muchos sistemas coloidales que tienen propiedades de flujo tixotrópico y cumplen un amplio rango en consistencia. El fenómeno tixotrópico es especialmente pronunciado con suspensiones de minerales de arcilla montmorillonita sódica y particularmente en sistemas en donde grandes volúmenes de agua son absorbidas y mantenidas entre las partículas coloidales.

En la actualidad, el fenómeno de la tixotropía no está aún bien estudiada, y no ha surgido todavía ninguna teoría satisfactoriamente completa. La única cosa que puede decirse es que el fenómeno tixotrópico es una función de tal estructura de materia coloidal que, cuando se le rompe por aplicación de energía puede restablecerse por si misma. También puede asumirse que las partículas coloidales están rodeadas y por esto separadas unas a otras por partículas de humedad. Las fuerzas que actúan entre las partículas espaciadas relativamente bajas, son relativamente pequeñas, una condición que puede ser temporalmente centralizada sacudiendo ligeramente la composición tixotrópica.

Una antigua prueba para la tixotropía consiste en sacudir vigorosamente una suspensión coloidal en un tubo de prueba y observar el tiempo necesario para que se gelatinice o tenga tal consistencia que al voltearlo no fluya el contenido (ver figura 4.4). En el tubo izquierdo se encuentra una suspensión bentonítica en la forma del gel, mientras que en el tubo de la derecha de la figura, la suspensión está en el estado de sol.

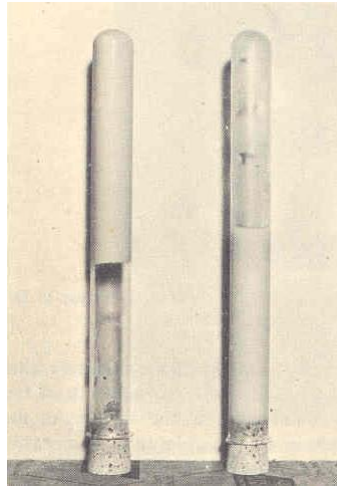


Figura 4.4: Prueba de Tixotropía.

Después de la cesación de la agitación, se supone que las partículas coloidales se encuentran en estado de movimiento browniano. Este movimiento decrece gradualmente en intensidad hasta que se establece un equilibrio entre las fuerzas eléctricas y gravitacionales. Durante la disminución del movimiento browniano, las partículas coloidales y las moléculas de agua se orientan por sí mismas en cierto orden. Esta orientación se produce lentamente, de aquí que la resistencia tixotrópica de la materia (gel) se desarrolla gradualmente dentro de cierto tiempo de gelatinización. Por otro lado, se destruye por un periodo definido de tiempo, el desarrollo gradual de la resistencia tixotrópica.

El sacudimiento o golpeteo del tubo de prueba que contiene un gel tixotrópico prevendrá la orientación de las partículas coloidales y las moléculas de agua, y el gel se transformará en sol.

El tiempo de gelatinización, depende por supuesto de la concentración del sólido. Por ejemplo, Winkler a los siguientes tiempos de gelatinización para montmorillonítica sódica, como una función de la relación líquido a sólido (por volumen).

Relación líquido/sólido	Tiempo de gelatinización
33	1
34	6
36	45

Tabla 4.15: Relación Líquido/Sólido Vs Tiempo de Gelatinización

Los cambios tixotrópicos pueden también deberse a ondas ultrasónicas. Winkler presenta los siguientes datos obtenidos con frecuencias de 175 Khz. En la columna 1 de la tabla 4.16 se dan los tiempos de exposición en segundos que requieren para licuar una sustancia montmorillonítica, la concentración del cual es dada en la columna 2 de la misma tabla como la relación volumétrica del líquido al sólido (V_l/V_{sol}).

Tiempo de exposición (en segundos)	Concentración $Vl/Vsol$
0	40
5	50
10	58
15	62
30	66
45	68
60	69
120	72
180	72

Tabla 4.16: Licuación por Ultra Ondas

La tabla 4.17 contiene datos de Winkler sobre la energía eléctrica que se necesita para licuar geles tixotrópicos de diversas concentraciones. Como una concertación para estas pruebas la relación del volumen del líquido a la fase sólida expresada en gramos en aquel volumen ha sido escogido.

Concentración ($Vl/Vsol$)	Energía ($volts$) ² $\times 10^2$
12	225
16	170
20	121
24	100
28	74
30	70.5
32	68
34	64
36	64

Tabla 4.17: Energía Requerida Para Licuar Diversas Concentraciones de Geles Tixotrópicos.

La información presentada en las tablas 4.16 y 4.17 deberá de ser de considerable interés para ingenieros de cimentación y movimientos de tierras cuando se diseñan y construyen estructuras hidráulicas y de movimiento de tierra en áreas que contienen formaciones de arcillas tixotrópicas o cuando la materia tixotrópica, tal como suspensiones de minerales de arcilla montmorillonitas sódicas son usadas para inyecciones debajo de cimentación vibratorias, por ejemplo, fundaciones para máquinas, plantas de fuerza o presas.

Tixotropía del Suelo

Terzaghi y Peck describen la tixotropía del suelo como sigue: “si una muestra de un suelo muy fino es completamente amasada y después se la deja sin perturbarla más, adquiere una resistencia cohesiva, al comienzo a una velocidad relativamente rápida y después más y más

lentamente. Si la muestra es nuevamente amasada sin alterar su contenido de agua, su cohesión decrece considerablemente, pero si una vez más se le deja sin perturbarla, vuelve su cohesión completamente a ganarla. Este fenómeno es conocido como tixotropía. El ablandamiento y subsiguiente recuperación parece ser debido a la estructura y posterior rehabilitación de la estructura molecular de las capas absorbidas.

Estas y otras observaciones efectuadas al estudiar materiales arcillosos, indican que un fenómeno análogo a la tixotropía, puede ser notado al deformar arcillas por acción de cargas estáticas. En particular este fenómeno se muestra por deformaciones que causan un considerable cambio de la estructura original de las arcillas, por ejemplo, al corte o a una considerable compresión. Especialmente, el efecto de la velocidad de carga, por ejemplo, el efecto del tiempo que es un factor decisivo; bajo cambios lentos de carga, la interacción mútua de las fuerzas dentro del sistema de arcilla es muy poco afectado y se restablece rápidamente. En consecuencia, la resistencia del suelo a deformaciones lentas es mayor que a deformaciones rápidas.

Usos y Aplicaciones en la Ingeniería Civil

Son muy numerosos los usos industriales de las bentonitas, tanto que resulta difícil enumerarlos todos. Desde el punto de vista industrial, la mayor parte de las aplicaciones no requieren especificaciones estrictas en cuanto a composición química (composición de las cargas tetraédricas y octaédricas). Sin embargo, en el caso de las bentonitas sí tiene importancia el quimismo del espacio interlaminar y sus propiedades fisico-químicas.

A continuación se presenta las aplicaciones más prácticas a la Ingeniería Civil y se muestra la siguiente figura 5.1 y figura 5.2:

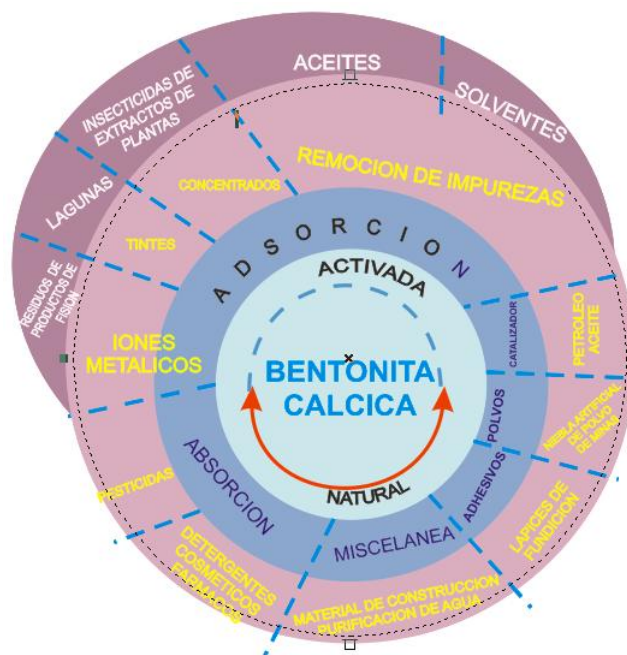


Figura 5.1: Bentonita Cálcica.

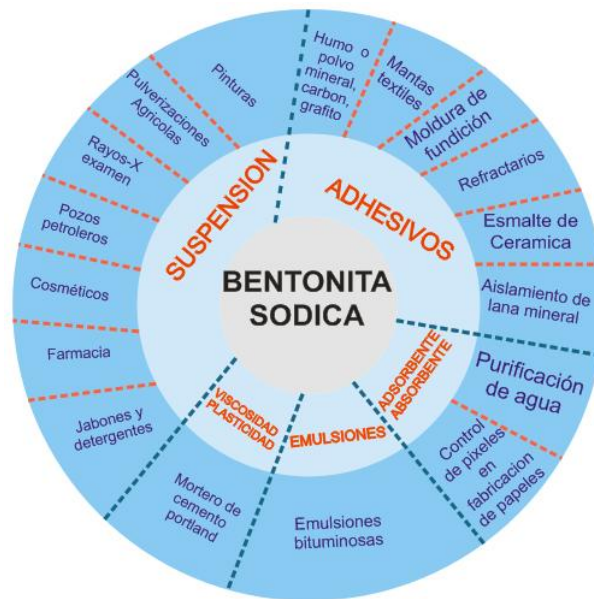


Figura 5.2: Bentonita Sódica.

5.1. Lodos de Perforación

En el proceso de perforaciones en rocas blandas y/o en rocas duras de diámetro y profundidad variables se hace necesario el uso de lodos de perforación o agua pesada la que permitirá enfriar la sonda, elevar el ripio de perforación y sostener las paredes del sondeo.

La técnica de los lodos de perforación deben cumplir las propiedades en la que el líquido no empape las formaciones y de peso específico suficientemente elevado, y que sea capaz de depositar una costra estanca llamada “cakes” o pasta que realice la misión de entubado.

Los lodos de perforación son habitualmente suspensiones coloidales a base de arcillas en la que el agua se presenta bajo las formas siguientes:

- Agua libre entre las partículas.
- Agua adsorbida; es decir, se fija rígidamente sobre la superficie de las partículas.
- Agua absorbida o de solvatación formando parte integral de las partículas y transformándolas más o menos en gelatina.

El agua adsorbida depende de la superficie específica total de las partículas, y la de solvatación de su volumen. Por tanto, para una cantidad de agua determinada, el agua de adsorción será tanto más importante cuando más pequeña sea la dimensión de las partículas. Por ejemplo, las Bentonitas, cuyas partículas en casi su totalidad tienen una medida inferior a una micra, son excelentes para la fabricación de lodos de perforación.

Es importante conocer algunas características de los lodos, como:

- El agua libre y el espesor de la costra correspondiente.
- La densidad.
- La viscosidad y la tixotropía.

Que son las que condicionan el sostenimiento de las paredes del sondeo y la facilidad de poder trabajar (bloqueo de las herramientas de perforación, costra demasiado espesa, potencia de las bombas); también será necesario determinar:

- El estado eléctrico de la suspensión.
- Dimensión de partículas.

La formación sobre las paredes del sondeo de una costra que la sostenga, es la única justificación del empleo de un lodo como fluido de circulación. Como se sabe, la creación de una costra es el resultado de la absorción por el terreno del agua libre del lodo. Es preciso que esta costra sea simultáneamente delgada y resistente para permitir el paso de la herramienta de perforación y a la vez que asegure la estabilidad de las paredes.

Los lodos de arcilla bentonítica cálcica, son las más ordinarias y se activan con carbonato sódico o con fosfato sódico, el reemplazo de los iones Ca^{2+} por los iones Na^+ da lugar a una arcilla sódica cuyo hinchamiento por el agua es mayor que el de la arcilla cálcica. Las bentonitas sódicas presentan mayor aptitud de hinchamiento y son las más idóneas pero por su elevado costo, se acostumbra mejorar los lodos ordinarios cálcicos. Las cantidades empleadas pueden ser las siguientes:

- Para mejorar un lodo: 1 - 2 %.
- Para el mantenimiento de un pozo en la zona de horizontes arenosos: 3 - 4 %.
- En el caso de pequeños desprendimientos: 2.5 - 3.5 %.

Para aumentar el estado coloidal del lodo y su resistencia a los agentes nocivos se le puede añadir en orden de eficacia:

- Alginato sódico (extracto de algas marinas).
- Carboximetilcelulosa (CMC) (celulosa coloidal).
- Almidón (de trigo o de maíz).

Estos coloides orgánicos provocan un adelgazamiento de la costra y una mejora de la resistencia a las contaminaciones, pero para evitar su fermentación, sobre todo la del almidón (la CMC no es fermentable), es preciso añadir algunos productos especiales, por ejemplo un bactericida (fenol, formol, creosota, etc.)

Para mantener la viscosidad del lodo dentro de un valor conveniente es necesario recurrir a unos productos químicos denominados aditivos, estos son principalmente fosfatos, taninos, ácidos humitos y carbonatos.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas para bentonita son establecidas por API (Estados Unidos) y OCMA (Europa).

Especificaciones de lodos para perforación.

Bentonita API	
Lectura del dial del Viscosímetro @ 600 r.p.m.	> 30
Relación Punto de fluencia/Viscosidad plástica, máx.	< 3
Filtrado, cm ³ , máx	< 15,0 cm ³
Residuo > 75 micrones máx.	< 4,0 wt %
Humedad, máx.	< 10,0 wt %
Bentonita OCMA	
Lectura del dial del Viscosímetro @ 600 r.p.m.	> 30
Punto de fluencia (<i>lb/100ft²</i>)	< 6x viscosidad plástica
Filtración, relativo a 30 minutos	< 16,0 cm ³
Residuo > 75micrones	< 2,5 %
Humedad	< 13,0 %
Bentonita No Tratada	
Relación Punto de fluencia/Viscosidad plástica, máx.	< 1,5
Viscosidad plástica dispersada	> 10 cP
Filtrado dispersado	< 12,5 cm ³

Fuente: Industrial Minerals, Marzo 1991, Octubre 1994

5.2. Arenas de Moldeo Para Fundición

Las arenas de moldeo están compuestas por arena y arcilla, generalmente bentonita, que proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando su moldeo y dándole resistencia suficiente para mantener la forma adquirida después de retirar el moldeo y mientras se vierte el material fundido.

Se adiciona agua para activar la arcilla, el contenido de humedad del sistema es extremadamente crítico y puede afectar las propiedades físicas de una fundición.

Las bentonitas sódicas y cálcicas son utilizadas en una mayoría de operaciones de fundición, cada una realiza ciertas características de la arena de moldeo. Al comparar arena de moldeo hecha con 8% de bentonita sódica con arena similar con la misma compactibilidad hecha con 8% de bentonita cálcica, la diferencia entre las arcillas se muestra en la tabla 5.1

La tabla 5.1, claramente indica que la bentonita sódica da como resultado resistencias a la compresión en seco y a elevada temperatura, más altas. También muestra una resistencia a la tensión en húmedo sustancialmente más alta. Las elevadas propiedades en caliente y la alta resistencia en húmedo a la tensión de la bentonita sódica se requieren cuando se vacía hierro y acero para prevenir defectos tales como erosión de arena, inclusiones de arena y costras de expansión. Sin embargo, las propiedades en caliente incrementadas podrían aumentar la energía requerida para remover la arena de las piezas solidificadas, esto es incrementando el potencial de piezas rotas o con fracturas.

Características de arena	100% <i>Ben</i> – <i>Na</i>	100% <i>Ben</i> – <i>Ca</i>	50 : 50/ <i>Na</i> – <i>Ca</i>
Resistencia a la Compresión en verde	11.8 psi	14.3 psi	12.6 psi
Deformación a Resistencia Máxima	1.3%	0.95%	1.1%
Resistencia a la Tensión en húmedo	0.466 N/cm^2	0.071 N/cm^2	0.346 N/cm^2
Resistencia a la Compresión caliente	575 psi	110 psi	320 psi

Tabla 5.1: Características a Resistencia de la Bentonita en arenas de moldeo

Las bentonitas cálcicas son mejor conocidas por su habilidad para rápidamente desarrollar propiedades en verde. Ellas ofrecen un mejor flujo que la bentonita sódica, (la cual tiende a ser más plástica) y una mayor deformación a iguales porcentajes de humedad. Por lo tanto, tienen una mayor habilidad para fluir libremente a través del sistema de arena y dentro de profundas y/o cerradas cavidades en un modelo.

Ambas bentonitas pueden ser mezcladas en diferentes proporciones, lo cual es una práctica común. Al mezclar las arcillas, una fundición puede alcanzar en términos generales un promedio en las propiedades físicas.

Cambiar la cantidad total de arcilla y agua puede alterar la resistencia a la compresión de la arena verde, la permeabilidad y otras propiedades físicas. Generalmente, un porcentaje más alto de arcilla, hasta 12 %, traerá como resultado aumento en la resistencia. La cantidad de agua puede también tener un gran efecto en las resistencia a la compresión en verde, en seco y en caliente. Generalmente, incrementando el agua se incrementa la resistencia a la compresión en verde hasta un punto, referido como el punto de templado. Incrementos adicionales de agua traerán como resultado un decremento en la resistencia a la compresión en verde.

Ambas resistencias a la compresión, en seco y en caliente, muestran un incremento en la resistencia conforme se incrementa la humedad dentro de un rango normal.

5.3. Inyecciones Profundas

Las inyecciones son procedimientos que se aplican al subsuelo, mediante los cuales se introduce en los poros o fisuras del medio a tratar un producto líquido (conocido como mortero o lechada de inyección), que se solidifica adquiriendo resistencias determinadas a través del tiempo.

El objetivo básico de este tratamiento es el de impermeabilizar o fortificar los macizos porosos tales como suelos granulares (gravas y arena), rocas fisuradas o fundaciones defectuosas, incrementando de este modo las propiedades mecánicas de los mismos.

Es importante saber identificar qué medios se pueden utilizar para remediar la naturaleza de los terrenos y también determinar cuáles son los factores que intervienen para fijar las condiciones de empleo de las inyecciones.

La inyección de suelos es un procedimiento de construcción reconocido por todos los ingenieros. Sus comienzos se fijan en Francia a principios del siglo XIX. Su inventor fue Bérigny en 1802, quien inyectó con éxito morteros de cemento, eventualmente asociados con puzolanas.

Poco a poco fueron perfeccionándose los métodos de inyección y los morteros utilizados, pero el mayor impulso de las inyecciones data de 1920 - 1930, época en que la construcción de ferrocarriles dio paso a la de grandes obras hidráulicas.

5.3.1. Usos de las Inyecciones

Algunos de los usos de las inyecciones son:

- Impermeabilizar el suelo debajo o alrededor de una estructura.
- Densificar los suelos de fundación para aumentar la resistencia a rotura y reducir la compresibilidad.
- Rellenar grietas para prevenir asentamientos excesivos.
- Controlar el movimiento del suelo durante el proceso de ejecución de un túnel.
- Estabilizar arenas y aluviones gruesos.
- Apoyo de fundaciones.
- Estabilización de laderas.
- Control del cambio de volumen de suelos expansivos.

5.3.2. Medios Inyectables

El estudio de los medios inyectables se aplica a:

- Macizos rocosos fisurados (considera las fisuras como canales)
- Macizos granulares porosos (cuyos poros son muy distintos en tamaño)

En la inyección clásica de materiales granulares o rocas fisuradas se hace penetrar la lechada a presión a través de los huecos a tratar. En los macizos rocosos, las fisuras pueden considerarse de abertura prácticamente constante; mientras que en los suelos, los poros son muy desiguales. Evidentemente las lechadas de inyección y los métodos de relleno serán particulares en cada caso.

Las fisuras de los macizos rocosos se rellenan por colmatación hidráulica, con un mortero de cemento y agua, mientras que el relleno de los huecos o poros de un aluvión se produce por impregnación y rotura del macizo.

5.3.3. Ensayos que permiten caracterizar el material a inyectar

Ensayo Lugeon (1936):

Es un ensayo de absorción in situ, que se ejecuta en las rocas fisuradas y tiene por objeto proporcionar una idea aproximada de su permeabilidad. Consiste en inyectar agua a presión mediante una bomba y medir el caudal que escurre por las fisuras del macizo rocoso.

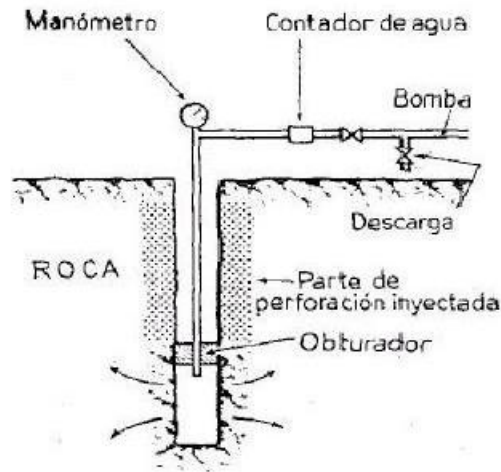


Figura 5.3: (Según H. Cambefort 1968): Principio en que se basan los Ensayos Lugeon

Ensayo Lefranc (aplicable a suelos granulares):

Este ensayo consiste en realizar una cavidad de forma más o menos determinada, en la base de un entubado estanco, tal como puede observarse en la figura 5.4. A continuación se procede a inyectar agua dentro del tubo, con lo cual se provoca un desnivel "H" respecto al nivel piezométrico.

El caudal que ingresa a la cavidad en m^3/seg estará dada por:

$$Q = C.K.H$$

Donde:

$C(m)$ = Coeficiente que depende de las dimensiones y forma de la cavidad filtrante.

$k(m/s)$ = Coeficiente de permeabilidad.

$H(m)$ = Desnivel en la altura del agua.

Tal como puede apreciarse en la figura 5.5:

- Para una cavidad considerada esférica: $C = 4\pi r_0$
- Si la cavidad es planar o discoidal tal como el fondo de un encamisado: $C = 5.7r_0$
- Si la cavidad es un cilindro o filtro cilíndrico resulta: $C = \frac{2\pi a}{\ln(a/r_0)}$

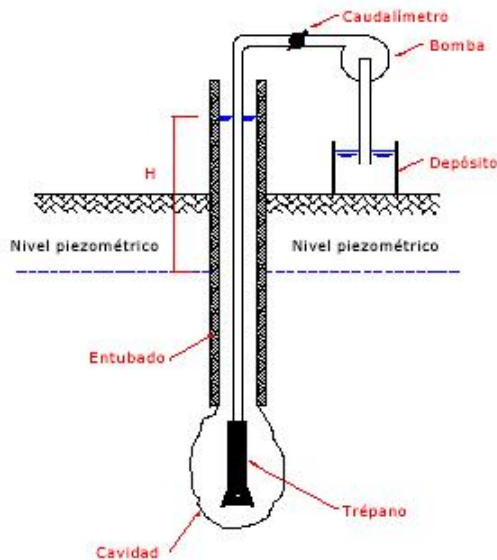


Figura 5.4: Principio en que se basan los Ensayos Lefranc

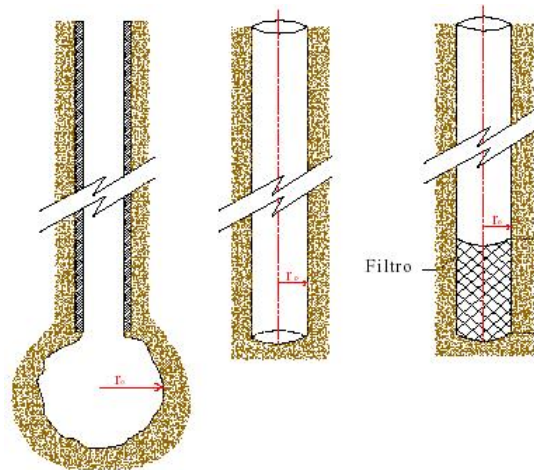


Figura 5.5: Diferentes formas de cavidades en un Ensayo Lefranc

5.3.4. Clasificación de las Inyecciones

Las inyecciones pueden clasificarse según su aplicación en:

- a) Inyecciones de Consolidación
- b) Inyecciones de Impermeabilización

a) Inyecciones de Consolidación

La consolidación de rocas muy fracturadas o terrenos no cohesivos puede hacerse mediante la aplicación de inyecciones, mientras que no es posible su aplicación para mejorar la resistencia natural de una arcilla o de un limo, ya que la permeabilidad de éstos es demasiado pequeña para permitir la introducción de un mortero.

Inyectando mezclas generalmente de cemento y agua en perforaciones realizadas a tal efecto, pueden llenarse los espacios existentes entre diaclasas u otras oquedades y homogeneizar el macizo rocoso.

Cuando la permeabilidad es baja pueden utilizarse mezclas más penetrantes tales como geles de silicato y resinas. Las dosificaciones de las mezclas varían notablemente, por ejemplo desde una proporción *agua/cemento* de 20:1 a 1:1. Las presiones de inyección son variables dependiendo de las características de los macizos, pero en orden de magnitud podría establecerse para un macizo rocoso, una presión de 20kg/cm^2 .

b) **Inyecciones de Impermeabilización**

Las inyecciones de impermeabilización tienen como finalidad disminuir las filtraciones a través de los suelos, aumentando de esta forma la seguridad del conjunto y disminuyendo la erosión interna. Son muy utilizadas en presas, para la formación de una pantalla o cortina estanca, que disminuye la filtración de agua a través de la misma. Esta disminución de flujo se logra a expensas del aumento de la pérdida de carga que se produce en la cortina.

5.3.5. Técnicas de Inyección

Actualmente son utilizados los siguientes métodos de inyección:

- Soil Fracture Grouting (Inyección por Impregnación y Rotura)
- Compaction Grouting (Inyección por Compactación)
- Inyección por Encapsulado o por Fracturas Hidráulicas
- Jet Grouting (Inyección por Reemplazo)
- Permeation Grouting (Inyección de Productos Químicos)

La inyección de productos químicos y por encapsulado son métodos de baja presión, mientras que el Jet Grouting, la inyección por impregnación y rotura, y la inyección por compactación, son métodos de alta presión.

5.3.6. Materiales Inyectables

Las mezclas empleadas en inyecciones, tanto para impermeabilización como para consolidación, pueden ser clasificadas en tres categorías principales:

- **Líquidas:** productos químicos o geles.

- **Suspensiones Inestables:** cemento y agua.
- **Suspensiones Estables:** suspensiones activadas.

Las líquidas están constituidas por productos químicos, como por ejemplo silicato de sodio, más o menos diluido, mezclado con un reactivo, resinas sintéticas o también productos hidrogenocarbonatados puros.

Las suspensiones inestables son simples suspensiones de cemento en el agua. Son las más comunes para la inyección de rocas. No son homogéneas más que en el caso de que se las agite. Cuando cesa la agitación comienza la sedimentación.

Las suspensiones estables, que prácticamente no tienen decantación, son obtenidas por ejemplo diluyendo arcilla en el agua o una combinación cualquiera de *arcilla – cemento y arena*. Es muy común su uso para inyección de suelos.

Para poder apreciar las cualidades y defectos de los morteros estables que es el tema que nos interesa, describiremos a continuación las suspensiones activadas.

Morteros Estables

Son suspensiones en el agua de granos suficientemente pequeños para que no pueda manifestarse sedimentación alguna durante la inyección. Una suspensión de arcilla coloidal, en tanto que no sedimente, pertenece a ese tipo de mortero, pero siempre que mantenga la fluidez necesaria para hacer posible la inyección y proporcione después la rigidez suficiente.

Para lograr esto, se aplican métodos que aseguren la defloculación de los coloides o por adición de éstos a productos más pobres. El mortero adquiere como consecuencia una cierta rigidez y de ella resulta una mejor suspensión del propio cemento y de la arena que eventualmente se le puede añadir.

Morteros de Cemento - Bentonita

La adición de bentonita aumenta la viscosidad de los morteros de cemento en los que la relación *agua/cemento* sea constante. Este aumento es más importante cuanto más densos son los morteros iniciales. La adición de una pequeña cantidad de bentonita al cemento permite realizar morteros inyectables que presentan una buena resistencia mecánica.

Morteros de Cemento - Silicato

La rigidez de un mortero de cemento queda mejorada por la adición de silicato de sodio. Esta mejora es tanto más importante cuanto más fuerte es la dosificación del cemento. Además si un mortero de estas características permanece en reposo, su rigidez va creciendo con el tiempo.

Frecuentemente, los morteros así tratados no son homogéneos, tendiendo el silicato a la formación de grumos. Para suprimirlos es necesario un tiempo muy largo de agitación, incompatible con las necesidades del trabajo. Por eso, estos morteros en la práctica no suelen utilizarse.

Morteros de Cemento - Bentonita - Silicato

La adición de bentonita a un mortero de cemento retarda su fraguado y disminuye su resistencia mecánica, pero proporciona un mortero homogéneo. El silicato acelera el fraguado, pero produce un mortero grumoso. Es pues conveniente combinar estos productos.

La experiencia demuestra que el mortero así obtenido es homogéneo y tiene una rigidez inicial más importante que únicamente con la bentonita, teniendo un comportamiento claramente tixotrópico.

Morteros de Cemento Activados

Cuanto más fuerte es la dosificación en cemento de un mortero, más débil es su decantación. Una dosificación muy fuerte, variable según la naturaleza del cemento permitirá la obtención de una decantación nula. Esta clase de morteros es generalmente inyectable.

Pero sometidos a ciertos tratamientos se llega a obtener un producto que presenta las características deseadas, estos tratamientos provocan la defloculación de los coloides de la suspensión, obteniéndose de esta forma morteros activados. El objeto de la activación, es permitir la obtención de morteros inyectables de elevada dosis en cemento, que tengan una ligera sedimentación o incluso ninguna.

Pueden distinguirse principalmente dos clases de activaciones: por vía química y por vía mecánica.

- La dispersión por vía química permite obtener morteros de dosificación relativamente pequeña y sedimentación nula, mediante el empleo de productos que proporcionan plasticidad, fluidez y aumento de volumen. Algunos plastificantes, convenientemente elegidos, impiden la floculación del cemento.

Para reducir la sedimentación se pueden llegar a utilizar productos que aumenten el volumen del mortero antes de su fraguado. Estos productos generalmente están constituidos por un polvo fino de aluminio que al reaccionar con la cal del cemento desprende burbujas de hidrógeno, muy pequeñas y numerosas.

- La dispersión mecánica es muy empleada, se obtiene haciendo pasar un mortero de cemento convenientemente dosificado por un mezclador especial. Estos mezcladores provocan una agitación o, mejor dicho, un laminado extremadamente violento. Este laminado provoca el desprendimiento de los granos de cemento adheridos a la superficie, por lo que la película de hidrato es eliminada precipitando al estado coloidal, de donde provienen las propiedades del mortero.

Geles de Arcilla

Para que una suspensión de arcilla permita impermeabilizar correctamente un medio permeable cualquiera, es necesario que después de la inyección presente una rigidez suficiente

para no ser impulsada por la presión de las aguas, es necesario que esta suspensión sea tixótrona.

La tixotropía es una propiedad natural de las buenas bentonitas, pero es necesario someter a tratamiento la arcilla para darle esta propiedad. Esto no es fácil porque para que un mortero sea aceptable, tiene que ser relativamente elevada su rigidez al reposo.

Morteros de Arcilla - Cemento

Un mortero de arcilla pura que no presente una tixotropía bastante fuerte corre el riesgo de ser deslavado en el transcurso de la inyección, o bien, si no está suficientemente aireado, de no resistir la carga de agua a la que se verá posteriormente sometido. Es importante por lo tanto dar al producto final una cierta resistencia mecánica para bloquear los intersticios del suelo. Esta resistencia puede ser de apenas unos pocos kilos por centímetro cuadrado.

Se llega a este resultado añadiendo cemento a la arcilla, pero al mismo tiempo se sacrifica la principal propiedad de la arcilla, ya que se añaden a granos muy pequeños, los granos de cemento, que son mucho más gruesos.

Se ha observado igualmente que la adición de cemento permitía realizar suspensiones estables, dotadas de más o menos rigidez, con arcillas no muy finas y difíciles de poner en suspensión en estado puro. El cemento proporciona los coloides necesarios para alcanzar este resultado. Para tener una fluidez conveniente, los morteros arcilla - cemento están en general débilmente dosificados en cemento y fuertemente en arcilla, contrariamente a los morteros cemento - bentonita, ya que la bentonita es mucho más coloidal que la arcilla.

La adición de cemento a una suspensión de arcilla permite aumentar el contenido de materia seca sin perjudicar la inyectabilidad del mortero.

Dosificaciones de morteros estables

Los morteros anteriormente descritos pueden considerarse estables. Un ejemplo ilustrativo de una dosificación empleada para la impermeabilización de un aluvión mediante la utilización de una pantalla de tres filas, con una permeabilidad inicial de $k = 10^{-4}m/s$ es la siguiente:

Arcilla defloculada y decantada a partículas menores de 16μ	89 %
Cemento de molienda fina	11 %
Relación Agua/Material	7 a 8

Tabla 5.2: Dosificación empleada en la fila central.

Suelo	82.5 %
Cemento	15 %
Bentonita	1.5 %
Silicato	1 %

Tabla 5.3: Dosificación empleada en las filas laterales.

Tiempo	Resistencia Mecánica en Kg/cm^2 para una relación Agua/Material=2	Resistencia Mecánica en Kg/cm^2 para una relación Agua/Material=3
24 hs.	0.2	0.03
48 hs.	0.26	0.04
72 hs.	0.4	0.10
7 días.	0.7	0.13
14 días.	1.2	0.20
28 días.	2.5	0.32
60 días.	3	0.55

Tabla 5.4: Relación de Resistencia Mecánica Vs Tiempo

Este aluvión presentaba las siguientes características granulométricas:

Tamiz	% que pasa
$1\frac{1}{2}''$	100 %
$3/8''$	96 %
N° 4	90 %
N° 40	20 %
N° 200	4 %

Tabla 5.5: Granulometría del Suelo de Cimentación

Con la utilización de estas lechadas se obtuvieron valores de permeabilidad finales de $k = 10^{-6}m/s$

Ejemplos Prácticos del Uso de Inyecciones

Cortinas de inyección bajo grandes Diques de Materiales Suelos. En la figura 5.6 se pueden observar cortinas de inyección realizadas en diferentes diques de materiales sueltos.

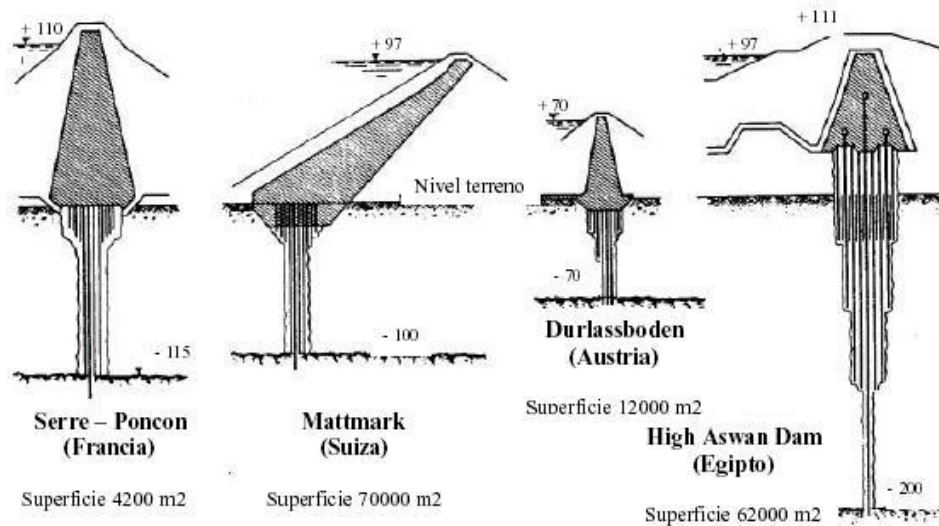


Figura 5.6: Ejemplos de Cortinas de Impermeabilización Bajo Presas (Según Foundation Engineering, 1991)

5.4. Drenajes

El drenaje es un elemento extremadamente importante para las estructuras en contacto con suelos, como edificaciones, muros de contenciones, túneles, estructuras hidráulicas, presas, etc.; pues tiene la función de aliviar las presiones hidrostáticas que actúan sobre la estructura, contribuyendo por lo tanto a su estabilidad. Cuando la impermeabilización no está especificada en el diseño, el drenaje debe también proteger la estructura contra infiltraciones.

En una edificación o en una estructuras en contacto con suelos, una simple impermeabilización puede no ser suficiente para evitar infiltraciones indeseables, es necesario prever en la interfase suelo-estructura, un sistema de protección compuesto por tres elementos: impermeabilización, drenaje vertical y un sistema colector drenante.

- **Impermeabilización:** Sólo es eficaz si está protegida contra las acciones mecánicas de instalación o de trabajo y si no está sujeta a presiones hidrostáticas, se requiere un sistema drenante eficiente.
- **Drenaje vertical:** Colocado entre la estructura y el suelo debe desempeñar las funciones de conducción de las aguas de percolación e infiltración hacia el colector longitudinal y proteger la impermeabilización contra daños.

- **Sistema colector drenante:** Compuesto por un tubo perforado colocado en la parte inferior de la superficie a ser drenada, envuelto por material filtrante. Su función es conducir hacia la red principal de drenaje las aguas recibidas del dren vertical.

5.5. Edificaciones

Las Bentonitas se empezaron a utilizar para este fin en Europa en los años 50, y se desarrolló más tarde en Estados Unidos. Se utiliza para cementar fisuras y grietas de rocas así como mejoramiento del suelo de fundación, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, impermeabilización de losas y muros de hormigón de cimentación, impermeabilización de trincheras, estabilización de embalses, etc.

Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad.

Las Bentonitas Sódicas o Cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso. Los usos en este campo se pueden resumir en:

- Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones.
- Prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de Bentonita.
- Protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas.
- En cementos: aumenta su capacidad de trabajabilidad y su plasticidad.
- En túneles: ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3 - 5% de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel). También es posible el transporte de los materiales excavados en el seno de fluidos bentoníticos por arrastre.
- En tomas de tierra: proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados.

Como Membranas de Impermeabilización

Existe una variedad muy importante de membranas usadas en la impermeabilización, las más usadas son las de origen asfáltico, polímero y PVC. En general y en estricto rigor, todas cumplen muy bien la función de diseños; si fallan se debe exclusivamente a una mala instalación, a una fusión (generalmente térmica) mal realizada o a una deficiente y descuidada intervención del hombre.

Las membranas bentoníticas minimizan notoriamente la intervención de la mano de obra, es decir, balancean el “error” con la Bentonita, ya que si en la instalación se ha roto el HDPE (Polietileno de alta densidad, hasta un ϕ máximo de 5 mm), o bien se ha generado una cicatriz (un corte con una herramienta tipo cuchillo, por ejemplo) y no se detecta en su inspección final, sigue siendo 100 % efectiva, es decir, 100 % impermeable ya que si bien es cierto falla el HDPE y filtra agua, esta se encuentra con la Bentonita, se genera saturación, hinchamiento y sello automático del foco de filtración. Visto desde otro punto de vista, es “autoreparativa”. Las membranas bentoníticas están compuestas básicamente por una lámina de HDPE en espesor de 0.4 mm y Bentonita adherida de espesor 4,5 mm que en conjunto se aplica en las situaciones más extremas de impermeabilización. Su comportamiento se basa en que la primera barrera (HDPE) por si sola actúa como membrana y de fallar ésta, generalmente en su instalación como ocurre con la gran mayoría de las membranas, actúa inmediatamente la Bentonita, una arcilla sódica o cálcica activada, que en contacto con el agua se satura, hincha y frena absolutamente el paso del agua. Esta es una característica típica de los suelos arcillosos que en presencia del agua, como la lluvia, son impermeables e impiden que ésta baje y se incorpore a la napa. Contamos, entonces, con una doble barrera impermeable que al fallar la primera (HDPE) responde incondicionalmente la segunda, que es la que nos da la tranquilidad del sistema.

Por otro lado, el HDPE es un polímero de cadena lineal no ramificada que se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas con catalizador alquilmetálico o un óxido metálico sobre sílice o alúmina. Posee una alta resistencia química y térmica así como opacidad, impermeabilidad y dureza.

Estas características son transmitidas en su totalidad a las membranas lo que las hace un producto de alta confiabilidad en sus más variados usos.

Las membranas bentoníticas son la expresión técnica que concentra estos conceptos. Esta unión de dos productos eficaces resuelve la problemática de impermeabilización en las estructuras que están en contacto con terrenos muy húmedos, saturados, o en contacto con napas. La Bentonita disponible en esta membrana se caracteriza por una elevada proporción Na_2O/CaO , lo que permite que el producto absorba una enorme cantidad de agua generando una expansión volumétrica aproximada de 20 veces el volumen inicial y un peso 6 veces el inicial. Para que la membrana bentonítica trabaje efectivamente, necesita una carga (vertical u horizontal) mínima de 136 Kg/m^2 , de ser menor la presión ejercida por su hinchamiento “empuja” cualquier material que se ha usado en el confinamiento de ella. Esta carga se puede lograr con un mortero de 6 cm (2.250 Kg/m^3 en un mortero tamaño 10 mm) e incluso con relleno natural (10 cm de tierra bien compactada).

Ventajas en el uso de las Membranas Bentoníticas

- Es un Sistema Doble de Impermeabilización (HDPE + Bentonita).
- Es Autoreparativa.
- Muy alto rendimiento (en losas, 120 a 140 $m^2/hora$).
- No necesita fusión térmica, sólo se traslapa 8 cm y eventualmente se corchetea este traslazo, incluso se puede clavar a la losa.
- No es tóxica.
- Fácil acopio: rollos 1.22 x 7.38 cm en bolsas de plástico.
- Tolera amplio rango de temperatura ($-34^{\circ}C$ a $54^{\circ}C$).
- Permite circulación sobre ella antes de protegerla.
- En muros verticales, se instala simplemente con clavos tipo Hilti.
- Muy fácil y rápida reparación.
- Aplicada frente a Agua Dulce, Salada, Gases y Percolados.

Cordones Bentoníticos en Juntas de construcción

Los cordones bentoníticos son cintas de gránulos de Bentonita sin modificar, de sodio natural, unidos con ligante hidrodiluibles y contenidos entre dos mallas de refuerzo de polipropileno. Su uso es ideal para las juntas de construcción entre dos vaciadas de concreto, sobre todo en muros perimetrales que están en contacto con terrenos y estando éstos con un alto grado de saturación de agua. Esta característica define a los cordones bentoníticos como materiales ideales de apoyo en obras civiles elementales para lograr la impermeabilidad de los elementos de concreto. Sus usos son muy variados y van desde obras de edificación, túneles, pavimentos, construcciones enterradas, estacionamientos y, en general, hasta todas las obras de fundaciones.

5.6. Canales de Riego

Los canales son el principal medio físico para la conducción de las aguas desde su fuente de origen hacia las áreas de riego y por razones económicas, en prácticamente la totalidad de los proyectos el canal está siempre presente, ya sea en la conducción o en la distribución de las aguas.

El buen diseño de un canal es, por lo tanto, muy importante para ahorrar costos de construcción, operación, mantenimiento y de pérdidas de agua. Este diseño queda condicionado por variados factores, pero muy especialmente por las características de permeabilidad de los terrenos que el canal recorre. Desde este punto de vista, se distinguen dos grandes grupos de canales, los revestidos y los que no requieren revestimiento.

Existe una gran diversidad de materiales que se usan para revestir un canal, distinguiéndose tres grandes grupos de revestimientos:

- Duros, con materiales como el concreto, asfalto, albañilería o mampostería de piedra o ladrillo, shotcrete, losetas de concreto, suelo - cemento o plástico.
- De suelo, que puede ser suelto o compacto, grueso o delgado o también mezclas de suelo y bentonita.
- De membrana enterrada, que puede ser a base de bentonita, o plástica, o bien asfalto esparcido in situ o prefabricado.

5.7. Presas de Embalses

En presas de embalses es conveniente aprovechar la elevada impermeabilidad que genera la mezcla *cemento+bentonita*, que permite su utilización en cortinas de inyección o en pantallas blandas para formar recintos estancos.

Tanto la bentonita como el cemento tienen propiedades muy marcadas; la bentonita por su tixotropía y alta plasticidad y el cemento por su capacidad de fraguar, adquieren así características resistentes. La combinación de ambos se usa en inyecciones impermeabilizantes conformado por agua con un pequeño porcentaje de bentonita (del 2 al 6 % generalmente) al que se añade una cantidad variable de cemento, que en inyecciones suele ser de 75 a 200 % expresado en peso de agua e inferior al 50 % en otras aplicaciones. La mezcla resultante se mantiene en estado líquido durante ciertas horas gracias al poder retardante de la bentonita, permitiendo así su bombeo o la consiguiente realización de una perforación a su amparo y una mayor penetrabilidad en inyecciones que la lograda por la lechada de cemento; este lodo es tixotrópico como la bentonita, pero más denso y de color gris, siendo susceptible de mantener verticales y estables las paredes de la perforación y evitar con su viscosidad la sedimentación del cemento. Posteriormente se produce un fraguado lento del cemento, constituyendo un sólido de densidad baja y de gran contenido de humedad, con una extensa gama de resistencias según sea la relación *agua-cemento*; la bentonita aporta a dicho material una mayor impermeabilidad y una cierta plasticidad que disminuye la rigidez del sólido, permitiéndole adaptarse a algunos movimientos o asentamientos diferenciales sin agrietarse.

El empleo de la *bentonita-cemento* como producto de inyección posee las ventajas sobre la lechada de cemento por su mayor estabilidad, penetrabilidad e impermeabilidad. Las dosificaciones empleadas suelen oscilar del 2 al 6 por 100 de bentonita y del 50 al 150 por 100 de cemento.

El empleo en inyecciones desde comienzos de siglo ha permitido desarrollar una tecnología para la fabricación y manejo del lodo; así como una amplia gama de aditivos aptos para superar dificultades de diversa índole.

5.8. Túneles

La Humanidad a lo largo de su evolución, ha ido desarrollando y utilizando, de acuerdo a su nivel de desarrollo, diferentes técnicas de eficacia creciente en la excavación de rocas y suelos. En la ejecución de estas obras, el hombre se enfrentó con la necesidad de excavar tanto en materiales rocosos duros, como en materiales arcillosos blandos.

Para la construcción de túneles, hoy en día se emplea la tecnología de máquinas llamadas “Tuneladoras”, que son capaces de excavar túneles a sección completa, a la vez que colabora en la colocación de un sostenimiento, ya sea en forma provisional o definitiva.

La excavación se realiza normalmente mediante una cabeza giratoria equipada con elementos de corte y accionada por motores hidráulicos. El empuje necesario para adelantar se consigue mediante un sistema de gatos perimetrales que se apoyan en el último anillo de sostenimiento colocado o en zapatas móviles (denominadas grippers), accionados también por gatos que las empujan contra la pared del túnel, de forma que se obtiene un punto fijo desde donde empujarán.

Detrás de los equipos de excavación y avance se sitúa el denominado “equipo de rezaga” de la tuneladora, constituido por una serie de plataformas arrastradas por la propia máquina y que, a menudo, ruedan sobre rieles que la misma tuneladora coloca, donde se alojan todos los equipos transformadores, de ventilación, depósitos de mortero y el sistema de evacuación del material excavado.

5.8.1. Tipos de Tuneladoras

Dependiendo de la naturaleza de los materiales por excavar, se debe seleccionar la máquina para la construcción del túnel. Básicamente se pueden clasificar tres tipos de máquinas tuneladoras:

- a) **Las Tuneladoras de Roca Dura TBM (Tunnel Boring Machine).** También llamadas topes, son máquinas que funcionan empujando discos metálicos contra la roca produciendo su fragmentación.

- b) **Máquinas de Escudo de Presión de Tierras Balanceada (EPB Earth Pressure Balanced).** Son empleadas cuando el frente de excavación no es estable, funcionan con una cámara que se mantiene bajo presión en el frente de excavación en la que el suelo se hace pasar a través de un escudo.
- c) **Los Hidroescudos.** Son máquinas tuneladoras especiales para trabajar en arenas sueltas o gravas arenosas, son las más apropiadas para trabajar bajo niveles freáticos. La diferencia con los EPB es que la presión en la cámara se logra mezclando el terreno excavado con un lodo de agua y bentonita, lo que logra darle estabilidad al frente gracias a sus propiedades tixotrópicas, que posteriormente facilitan su extracción mediante potentes bombas a la planta de separación ubicada en la superficie. En esta planta de separación se separa el material excavado del lodo bentonítico para que vuelva a inyectarse en el circuito de lodos.

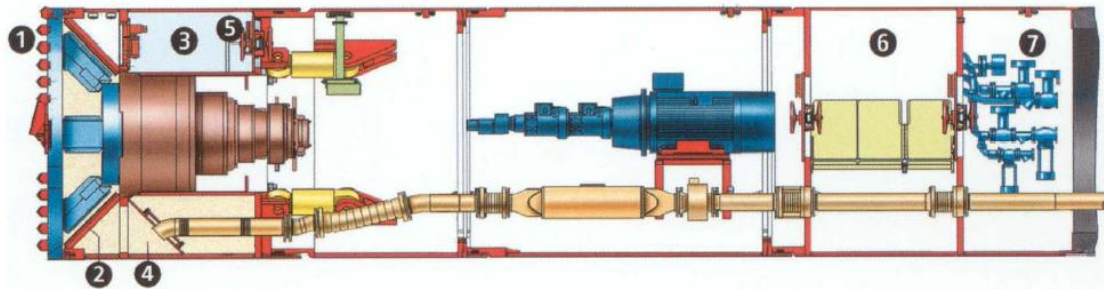


Figura 5.7: Esquema de Funcionamiento de un Hidroescudo

Donde:

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| (1) Corona de Corte. | (5) Escotilla de Acceso. |
| (2) Cámara de Machaqueo. | (6) Cámara de Descompresión. |
| (3) Cámara de Presión. | (7) Equipo de Presurización. |
| (4) Bentonita. | |

5.9. Lagunas de Estabilización y Rellenos Sanitarios

La creciente importancia que está tomando la legislación, en los últimos años, en lo referente a medio ambiente, ha favorecido la apertura y desarrollo de todo un mercado orientado hacia el uso de Bentonitas como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radioactivos de baja, media y alta actividad.

Durante muchos años las Bentonitas se han venido utilizando en mezclas de suelos en torno a los vertederos, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito. Esta mezcla se puede realizar in situ o sacando el suelo de su emplazamiento, mezclándolo con la Bentonita y

volviéndolo a colocar en su sitio. La ventaja de la primera alternativa es que supone un gasto menor, pero sin embargo, implica una mezcla menos homogénea. La segunda alternativa, sin embargo, es más cara pero asegura una mejor homogeneización de la mezcla bentonita-suelo. Por otro lado, esto disminuye la cantidad de Bentonita necesaria (5 - 6 %), frente a 7 - 8 % que se utiliza en mezclas in situ.

Más recientemente ha surgido una nueva tendencia en el diseño de barreras de impermeabilización que se basa en la fabricación de complejos Bentonitas-Geosintéticos (geomembranas y geotextiles).

Consiste en la colocación de una barrera de arcilla compactada entre dos capas, una de geotextil y otra de geomembrana (plásticos CINTA manufacturados, como polietileno de alta densidad o polipropileno, entre otros). La geomembrana es impermeable. Mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la Bentonita hinchar, produciendo la barrera de sellado compactada.

Esta utilidad de las Bentonitas como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. Las Bentonitas más utilizadas para ese fin son las sódicas, por tener mayor capacidad de hinchamiento.

Así mismo, se utilizan Bentonitas sódicas como material impermeable y contenedor en los siguientes campos:

- Como contenedores de aguas frescas: estanques y lagos ornamentales, campos de golf, canales, etc.
- Como contenedores de aguas residuales: efluentes industriales (balsas).
- En suelos contaminados: cubiertas, barreras verticales.
- En el sellado de pozos de aguas subterráneas contaminadas.
- En depósitos de residuos radioactivos: depósitos subterráneos, sellado de fracturas en granitos, etc.

5.10. Geotextiles (GCL)

Las Líneas de arcilla de Geosintéticos (GCLs) representa una tecnología relativamente nueva (desarrollada en 1986) ganándose actualmente la aceptación como un sistema de impermeabilización en aplicaciones prácticas a rellenos sanitarios y lagunas de estabilización.

La tecnología de GCL ofrece algunas ventajas extraordinarias sobre los rellenos y lagunas de estabilización convencionales.

El GCL, por ejemplo, es rápido y fácil de instalar, tiene la conductividad hidráulica baja (permeabilidad baja), y tiene la capacidad al ser reparada ante cualquier rasgón o deterioro causados por la hinchazón de las propiedades de la bentonita de que ellos son hechos.

El GCL tiene un costo efectivo en las regiones donde la arcilla no está fácilmente disponible. Un sistema del relleno de GCL no es tan grueso como un sistema de relleno que implica el uso de arcilla compactada, permitiendo a ingenieros a construir vertederos que llevan al máximo la capacidad al proteger el agua del suelo del área.

5.10.1. Material

Un GCL es una capa relativamente delgada de arcilla procesada (típicamente bentonita) incorporada entre dos hojas, una geomembrana y otra geotextil. Una geomembrana es un material polimérico relativamente impermeable, usados como revestimientos de contenedores de fluidos y gases y como barreras de vapor. Un geotextil es un tejido de hilos o mantas de fibras atados o cocidos, flexibles y permeables que son usados en aplicaciones de separación, filtración, drenaje, refuerzo y control de erosión. Ambos tipos de GCLs son ilustrados en la figura 5.8.

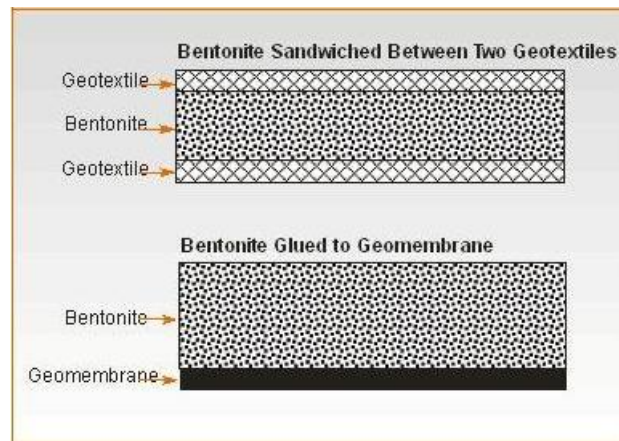


Figura 5.8: Configuración General de los GCLs

La bentonita es una arcilla muy absorbente y granular originaria de la ceniza volcánica, atrae partículas con carga positiva de agua; así hidrata rápidamente. Cuando la arcilla se hidrata, se hincha, dando la capacidad de sellante en el GCL.

La bentonita es puesta entre materiales sintéticos de varias maneras para formar el sistema de GCL. En configuraciones que utilizan una geomembrana, la arcilla es puesta utilizando un adhesivo. En configuraciones de geotextiles, sin embargo, se utilizan los adhesivos, fibras tejidas, fibras pinchadas, o una combinación de los tres.

Aunque las fibras tejidas y pinchadas creen pequeños hoyos en el geotextil, estos hoyos son sellados cuando se hidrata la capa de arcilla del GCL. figura 5.9 muestra la sección transversal de exposiciones de los tres enfoques separados al poner la bentonita a un geotextil.

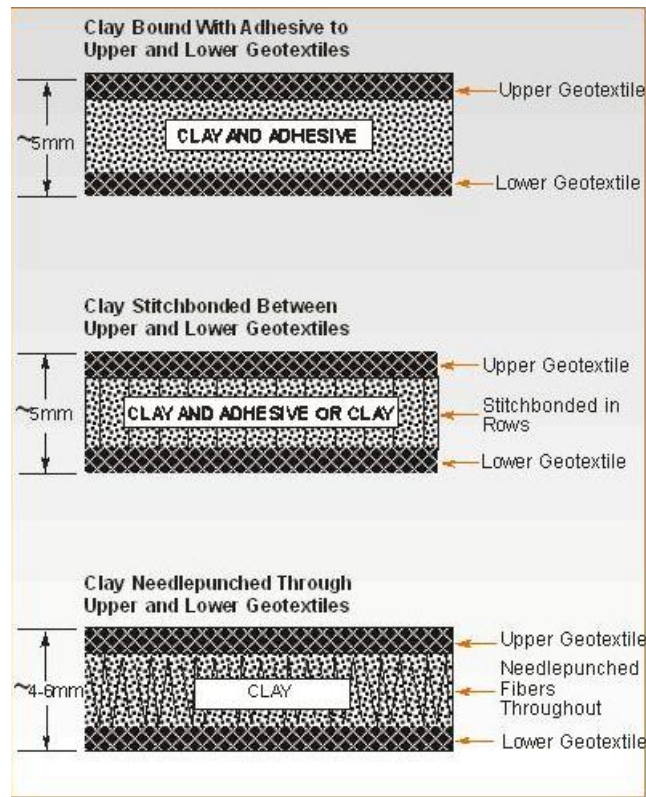


Figura 5.9: Colocación de Bentonita en los Geotextiles

5.10.2. Propiedades y Características

Un criterio importante para seleccionar un sistema efectivo de barrera del vertedero es la conductividad hidráulica. Antes de escoger un sistema de barrera, el operario del vertedero debe probar la tecnología para asegurar bajo que consideración se comportará la conductividad hidráulica, así como otras características, que serán apropiados para el vertedero de relleno sanitario así como de la laguna de estabilización.

5.10.3. Conductividad Hidráulica

La tecnología del GCL puede proporcionar un sistema de barrera con la conductividad hidráulica baja (permeabilidad baja), que es la tasa en que un líquido pasa por un material. Las pruebas del laboratorio demuestran que la conductividad hidráulica de la bentonita seca y libre es aproximadamente $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. Cuando esta saturado, sin embargo, la conductividad hidráulica de la bentonita es típicamente menos de $1 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$.

La calidad de la arcilla utilizada influye en las características hidráulicas del GCL. La bentonita sódica es la más indicada para la confección del GCL.

El desempeño hidráulico también relaciona a la cantidad de bentonita por área de unidad y su uniformidad. A más bentonita utilizada por unidad de área, disminuye la conductividad hidráulica del sistema.

Aunque la cantidad de bentonita por unidad de área varíe en un GCL particular, los fabricantes utilizan típicamente $1lb/pie^2$. Como resultado, la conductividad hidráulica en la mayoría de las variedades de productos de GCL se acerca de $1x10^{-5}cm/s$ a menos de $1x10^{-12}cm/s$.

Esto es, la permeabilidad de productos terminados de GCL dependen de una combinación de factores, inclusive el tipo y la cantidad de bentonita, la cantidad de aditivos, el tipo del material geosintético, y de la configuración del producto (es decir, el método de poner el geosintético a la arcilla).

5.10.4. Resistencia Cortante y Otras Características

Dependiendo de la configuración particular del sistema de la barrera, la tecnología de GCL puede proporcionar un considerable incremento de resistencia cortante sin perder su integridad estructural. En particular, un geotextil GCL, con bentonita puesta a través de un tejido de fibras, proporciona una resistencia interna adicional para cortar la capa de arcilla. Las fibras pinchadas rinden una barrera constante, más fuerte y más rígida. Además, las de fibras pinchadas requieren el uso de un geotextil de tejido de fibras en por lo menos un lado. Estas configuraciones de GCL proporcionan un aumento de la resistencia a la fricción de la capa adyacente, un factor importante para taludes de vertederos, rellenos sanitarios y lagunas de estabilización.

Tanto las fibras pinchadas como las fibras tejidas, tienden a aumentar el costo del producto del GCL. Las fibras pinchadas, en particular, añaden un costo alto al GCL, los geotextiles no tejidos son generalmente menos caros que el geotextil tejido.

Antes de seleccionar un sistema final de barrera, el operario de vertedero debe considerar otras características importantes del desempeño, como el libre y confinado hinchamiento (es decir, si la arcilla proporcionará una barrera uniforme) y la tasa de ruptura, que mide la resistencia a la deformación de la barrera.

5.10.5. Pruebas de Control

Las configuraciones de GCL para sistemas de impermeabilización son basadas en las especificaciones del diseño de cada proyecto específico. La Sociedad Norteamericana para Ensayos de Materiales (ASTM) desarrolló y estandarizó las pruebas del laboratorio para obtener el control de calidad en la producción:

- ASTM D5889 Standard Practice For Quality Control of GCLs.
- ASTM D5887 Standard Test Method for Measurement of Index Flux through Saturated GCL Specimens Using a Flexible Wall Permeameter.
- ASTM D5890 Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of GCLs.
- ASTM D5891 Standard Test Method for Fluid Loss of Clay Liner Component of GCLs.
- ASTM D5993 Standard Test Method for Measuring Mass per Unit of GCLs.
- ASTM D6243 Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of GCL by Direct Shear Method.

Conclusiones y Recomendaciones

La investigación geotécnica realizada para la determinación de las Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de la Bentonita de Socos-Ayacucho concluye conforme sus objetivos que:

En cuanto a las Propiedades Físicas:

- 1) Los Límites de Atterberg se observa en la carta de plasticidad de A. Casagrande que tienen un comportamiento como arcillas altamente plásticas (LL=152 %, IP=102 %) que corresponden clasificarlo en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos como un “CH” arcilla inorgánica de alta plasticidad y dentro del Sistema de Clasificación A.A.S.H.T.O. como un $A - 7 - 6(20)$.
- 2) El ensayo granulométrico se realizó por el método del Hidrómetro, resultando los contenidos de arcillas y coloides (78-80 %), limos (9-10 %) y arenas (10-12 %). La bentonita de Socos se determina como una arcilla inorgánica altamente plástica.
- 3) El fenómeno de expansividad se puede considerar como un suelo medianamente expansivo, ya que del ensayo de expansión libre que resultó un valor de 39 % corresponden a suelos potencialmente expansivos entre la categoría de media a alta.
- 4) Presentan grietas de contracción en todas direcciones y en una macro estructura en bloques por acción de la tensión capilar, generadas durante el proceso de desecación en estratos superficiales.
- 5) El contenido de Sales Solubles Totales, Sulfatos y Cloruros en la muestra de bentonita, indican la presencia de iones intercambiables alcalinos que predominan en las bentonitas cálcicas, así como el “pH” con valores medios de 8.00 que corresponderían a un suelo agresivo que pondrían en riesgo por sí mismas la durabilidad de estructuras de concreto armado y otras estructuras de tierras.
- 6) Los Pesos Volumétricos, la Relación de Vacíos, la Porosidad, el Grado de Saturación y la Consistencia son variables con respecto al contenido de humedad.
- 7) Es un suelo susceptible a las variaciones en su contenido de humedad, por lo que las Propiedades Físicas y Mecánicas estarán en dependencia de estas variaciones.

En cuanto a las Propiedades Químicas:

- 8) El mineral arcilloso predominante de la bentonita natural de Socos, es de tipo Montmorillonítico, complementado por la Cristobalita, la Albita y trazas de cuarzo y calcita según los ensayos de Difracción de Rayos X (RDX) y de material amorfo, realizado en el Laboratorio de Rayos “X” del INGEMMET.
- 9) De los resultados anteriores, se concluye que la bentonita natural de Socos es una bentonita Cálcica con material amorfo y las fases cristalinas encontradas con mayor presencia pertenecen a los siguientes grupos:
 - Feldespatos-plagioclasas: mineral más opcional la Albita.
 - Feldespatos-ortoclasa: mineral más opcional la Cristobalita.
 - Esmectitas: mineral más opcional la Montmorillonita.
- 10) El ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, Scanning Electron Microscopy) no se realizó debido al alto costo, pero de acuerdo a bibliografías muestra las partículas elementales del suelo que son de forma semejante a “hojuelas” o “panal de miel” y que a su vez aparecen formando grandes aglomerados.
- 11) Los análisis de composición química de la bentonita natural muestran las fases mayoritarias que consisten en el óxido de silicio y aluminico que son la base para la construcción de los sílico-aluminatos hidratados de calcio, magnesio, sodio y potasio que conforman el suelo natural (montmorillonita, cristobalita, albita y calcita). Los ensayos de análisis químicos se realizaron en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

En cuanto a las Propiedades Mecánicas:

- 12) Las propiedades mecánicas se obtuvieron en base a ensayos de compresión simple, corte directo y compresión triaxial, se aproximó a las condiciones reales en la que el suelo está sometido, aplicando así presiones de confinamiento semejante a las existentes en campo. Los parámetros efectivos que rigen la resistencia al corte de la Bentonita de Socos son $\phi = 14^\circ$ y $c = 0.21Kg/cm^2$. La resistencia a la compresión simple en aproximadamente $Cu = 0.30Kg/cm^2$, valores promedio que corresponden a suelos cohesivos.
- 13) La conductividad hidráulica de estos tipos de suelos, resultó ser netamente inferior a valores de $k < 10^{-4}cm/s$ y $10^{-6}cm/s$ al emplear el método de la pared flexible en probetas premoldeadas, que corresponden a suelos cohesivos e impermeables según la clasificación del sistema SUCS.

- 14) El comportamiento frente a la consolidación corresponde a suelos con una compresibilidad media de acuerdo a los valores del índice de compresión $C_c = 0.528$ y el índice de compresibilidad volumétrica $mv = 0.05\text{cm}^2/\text{Kg}$. De la curva edométrica obtenida se puede estimar el valor de la presión de pre-consolidación en $1.81\text{Kg}/\text{cm}^2$ y además situar la frontera entre los esfuerzos que provocarían asentamientos importantes y las que no en valores cercanos a $1\text{Kg}/\text{cm}^2$.
- 15) De los ensayos de compactación Próctor Estándar y Modificado, las Humedades Óptimas están por debajo de su correspondiente Límite Plástico, obteniéndose los pesos volumétricos secos máximos en un estado de consistencia semi-sólida.
- 16) La Humedad Óptima tiende a disminuir y el peso volumétrico seco máximo a aumentar, mientras mayor sea la energía de compactación aplicada.
- 17) El ensayo del C.B.R. sometido a un periodo de saturación varía de 0 - 4 %, esto evidencia la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante por efecto del incremento de la humedad y la expansión de la arcilla.
- 18) De los resultados de C.B.R. y de clasificación de suelo, dentro del S.U.C.S. y A.A.S.H.T.O. determinan que este tipo de suelo no es recomendable para ser utilizado como base o sub-rasante bajo pavimentos.

En cuanto a las recomendaciones:

- 19) En particular, para la profundización en la caracterización de la Bentonita de Socos, es recomendable continuar con más investigaciones para el empleo específico como material de construcción aplicada en cada caso a la Ingeniería Civil.
- 20) Es recomendable su uso como aglomerantes de arenas de moldeo para fundición, lodos de perforación e inyecciones que estará condicionada a la mezcla con otros productos que contribuyan a corregir ciertas deficiencias, así como material de sellado de residuos domésticos, industriales, tóxicos y/o radiactivos de baja a media actividad.
- 21) De las revisiones bibliográficas, se recomienda realizar investigaciones sobre la mezcla de suelo-bentonita para la construcción de barreras impermeables adecuadas como alternativas viables económicamente.
- 22) Finalmente, es recomendable realizar la viabilidad técnico-económica de la instalación de una Planta de Tratamiento de la Bentonita de Socos, que fortalecerá y asentará el Desarrollo Sostenido en la Región de Ayacucho.

Bibliografía

- [1] Bailey SW (1980a). *Structures of layer silicates*. In: Brindley GW & Brown G ed. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. /London, Mineralogical Society, pp 1-123 (Monograph N° 5).
- [2] Brindley GW & Brown G ed. (1980). *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. /London, Mineralogical Society, 495 pp (Monograph N° 5).
- [3] Deer WA, Howie RA, & Zussman J (1975). *An introduction to rock-forming minerals*. /London, Longman Group Ltd., 528 pp.
- [4] Ferraro JR ed. (1982). *The Sadtler infrared spectra handbook of minerals and clays*. /Philadelphia, Pennsylvania, Sadtler Research Laboratories, pp 354-356.
- [5] Granados Gonzales Ruiz Misael (1985). *Estudio para el aprovechamiento de Bentonitas de Ayacucho en el blanqueado de aceites comestibles*. /Tesis de Grado FIQ - UNSCH.
- [6] Gutierrez Vigo Jose Marcettis (1995). *Estudio de Prefactibilidad de Explotación Minera de la Bentonita de Socos - Ayacucho*. /Tesis de Grado FIMGC - UNSCH.
- [7] Greene-Kelly W (1955). *Dehydration of montmorillonite minerals*. /Mineral Mag,30:604.
- [8] Grim R.E. (1968). *Clay mineralogy, 2nd ed.* /New York, McGraw-Hill, 596 pp.
- [9] Grim R.E. & Guven N. (1978). *Bentonites Geology Mineralogy and Uses*. /New York, Amsterdam, Elsevier.
- [10] Hosterman JW & Patterson SH (1992). *Bentonite and Fuller's Earth Resources of the United States*. /Washington, DC, US Geological Survey, 45 pp (USGS Professional Paper 1522).
- [11] Jepson CP (1984). *Sodium Bentonite: Still a Viable Solution for Hazardous Waste Containment*. /Pollut Eng, 16(7): 50-53.
- [12] Jobling A. *Laboratorio Ernest Oppenheimer* /Departamento de Ciencia de Coloides, Universidad de Cambridge.

- [13] Alfredo R. Jumikis. *Soil Mechanics (1962)*.
- [14] Kuzvart M (1984). *Bentonite and Montmorillonite Clay. In: Industrial minerals and rocks. /Elsevier, Amsterdam, pp 280-287 (Developments in Economic Geology 18)*.
- [15] Lee RE (1993). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. /Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 458 pp.*
- [16] Lines M (2003). *Asian ceramic clays. /Ind Miner, 427: 50-55.*
- [17] Marek J & Blaha V (1982). *Morphology of the Bentonite and Kaolin-Induced Rat-Paw Oedemas. /Int J Tissue React, 4: 103-114.*
- [18] Martínez Vargas, Alberto. *Apuntes de clase y traducciones de clase. /*(2003) Docente FIC - UNI - Postgrado - Lima - Perú.
- [19] Marisa García Romero. *Bentonitas.*
- [20] Miller RW, Honarvar S, & Hunsaker B (1980). *Effects of Drilling Fluids on Soils and Plants: Individual fluid components. /J Environ Qual, 9: 547-552.*
- [21] Moore DM & Reynolds RC Jr (1989). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. /Oxford, Oxford University Press, 332 pp.*
- [22] Murray HH (1994). *Common clay. In: Carr DD ed. Industrial minerals and rocks. /Littleton, Colorado, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, pp 247-248.*
- [23] Patterson SH & Murray HH (1975). *Clays. In: Lefond SI ed. Industrial Minerals and Rocks, 4th ed. /New York, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, pp 519- 595.*
- [24] Patterson SH & Murray HH (1983). *Clays. In: Lefond SI ed. Industrial Minerals and Rocks, 5th ed. New York, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, pp 585-651.*
- [25] Polanski J. *Flujos Rápidos de Escombros Rocosos en Zonas Ácidas y Volcánicas (1966)*.
- [26] Pozo Rodríguez Manuel & Carretero León María Isabel (2007). *Mineralogía Aplicada - Salud y Medio Ambiente /Thomsom Ed. Spain, Madrid-España.*
- [27] Righi F. & Meunier A. (1995). *Origin of Clays by Rock Weathering and Soil Formation. In: Velde B ed. Origin and Mineralogy of Clays. /Berlin, Springer - Verlag, pp 103-161.*
- [28] Relatorios del IX Congreso Geológico Argentino. *Geología y Recursos Naturales de las provincias de Río Negro, Neuquén y Buenos Aires. /Año 1984 y 1978.*

- [29] Starkey HC, Blackmon PD, & Hauff PL (1984). *The Routine Mineralogical Analysis of Clay - Bearing Samples*. /Washington, DC, US Geological Survey, 32 pp (US Geological Survey Bulletin 1563).
- [30] Saathoff, F. & Zitscher, F. (2001). *Geosynthetics in Geotechnical and Hydraulic engineering*. In: *Geotechnical Engineering Handbook, Vol. 2 Procedures 12/2002*. /WILEY, Berlin.
- [31] Terzaghi y Peck. *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Practica (1958)*.
- [32] Thorez J. (1975). *Phyllosilicates and Clay Minerals: A Laboratory Handbook for Their X-ray Diffraction Analysis*. /Dison, Editions G. Lelotte, 579 pp.
- [33] USGS (2001). *A Laboratory Manual for X-ray Powder Diffraction*. /Washington, DC, US Geological Survey (Open-file report 01-041). Available at: <http://pubs.usgs.gov/of/of01-041/htmldocs/clays/illite.htm> (last modified on 11 October 2001).
- [34] Van der Marel HW & Beutelspacher H. (1976). *Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and Their Mixtures*. /Oxford, Elsevier, 396 pp.
- [35] Velde B. (1985). *Clay minerals. A Physicochemical Explanation of Their Occurrence*. /Amsterdam, Elsevier, pp 70-82.
- [36] Velde B. ed.(1995). *Composition and Mineralogy of Clay Minerals*. In *Origin and Mineralogy of Clays*. /Berlin, pp 27-33 (Clays and the Environment, Vol 1).
- [37] Virta RL (1997). *US Geological Survey Mineral Industry Surveys. Clays-1997*. /Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/190497.pdf>.
- [38] Virta RL (1999). *US Geological Survey Mineral Industry Surveys. Clay and Shale-1999*. /Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/190499.pdf>.
- [39] Virta RL (2001). *US Geological Survey Mineral Industry Surveys. Clay and Shale-2001*. /Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/claymyb01.pdf>.
- [40] Virta RL (2002). *US Geological Survey Mineral Industry Surveys. Clay and Shale-2002*. /Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/claysmyb02.pdf>.