

**LA PRUEBA DE AZUL DE METILENO COMO METODO PARA CALIFICAR  
LA NOCIVIDAD DE LOS SUELOS FINOS**

**CARLOS ANDRES MANRIQUE CASTRO  
VICTORIA EUGENIA MUÑOZ VALENCIA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN  
2005**

**LA PRUEBA DE AZUL DE METILENO COMO METODO PARA CALIFICAR  
LAS NOCIDIDAD DE LOS SUELOS FINOS**

**CARLOS ANDRES MANRIQUE CASTRO  
VICTORIA EUGENIA MUÑOZ VALENCIA**

**Trabajo de grado**

**Director  
JULIA EUGENIA RUIZ DE MURGUEITIO  
Ingeniero Civil  
Msc. en Ingeniería con énfasis en Vías**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN  
2005**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma del Director

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Popayán, Abril de 2005

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Julia Eugenia Ruiz, Ingeniero Civil y Director de la Investigación, por sus valiosos aportes, orientaciones y constante motivación.

Hugo León Arenas, Ingeniero Civil y Director de los Laboratorios de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de La Universidad del Cauca, por las facilidades de usar los equipos e instalaciones del Laboratorio.

Personal del Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, por su colaboración y ayuda en el suministro de equipo y elementos necesarios.

Comité de Investigaciones de La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, por su colaboración y la confianza depositada para llevar a cabo esta investigación. En especial al grupo de Geotecnia Vial.

## **CONTENIDO**

	pág.
INTRODUCCION	13
1. MARCO TEORICO	15
2. METODOLOGIA	48
3. RESULTADOS	57
4. ANALISIS DE RESULTADOS	64
5. CONCLUSIONES	80
6. RECOMENDACION	83
BIBLIOGRAFIA	84
ANEXOS	86

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Valores típicos de actividad.	24
Cuadro 2. Valores de capacidad de intercambio catiónico de varios minerales arcillosos.	25
Cuadro 3. Fronteras de la carta de plasticidad.	30
Cuadro 4. Parámetros de compresibilidad.	31
Cuadro 5. Nomenclatura USCS.	38
Cuadro 6. División de grupos.	38
Cuadro 7. División de las arenas.	39
Cuadro 8. Parámetros para definir suelos gruesos bien gradados.	39
Cuadro 9. Parámetros para definir gravas y arenas sucias.	39
Cuadro 10. Sistema AASHTO de clasificación de suelos.	41
Cuadro 11. Rangos de plasticidad.	48
Cuadro 12. Descripción de los suelos en estudio.	48
Cuadro 13. Normas utilizadas en el estudio.	49
Cuadro 14. Variaciones de las condiciones en los ensayos de Valor de Azul.	52
Cuadro 15. Resultados del valor de azul con las variantes contempladas.	58
Cuadro 16. Resultados de los índices evaluados en el estudio.	59
Cuadro 17. Resultados de superficie específica, $e = 0.5$ .	60
Cuadro 18. Resultados de superficie específica, $e = 0.63$ .	60

Cuadro 19. Valor de azul para ensayos con 0.02 y 0.05 g. de azul de metileno de acuerdo a norma INVIAS.	62
Cuadro 20. Resultados del valor de azul de metileno del suelo rojizo variando el contenido de humedad.	63
Cuadro 21. Análisis de la sensibilidad al agua.	63
Cuadro 22. Relación entre el valor de azul y fracciones pasa N°200, pasa N°40.	64
Cuadro 23. Relación del valor de azul y fracciones pasa N°40, pasa N°200.	64
Cuadro 24. Ensayos del valor de azul a la fracción <74 $\mu\text{m}$ sin inmersión.	66
Cuadro 25. Resultados del valor de azul en diferentes fracciones vs. Valores del límite líquido.	68
Cuadro 26. Relación entre el %<2 $\mu\text{m}$ de la fracción pasa N°40 vs. El índice de plasticidad.	69
Cuadro 27. Relación entre la cantidad de arcilla pasa N°40 vs. El Valor de Azul.	70
Cuadro 28. Relación entre la cantidad de arcilla pasa N°200 vs. El valor de azul pasa N°200 según norma.	71
Cuadro 29. Relación %<2 $\mu\text{m}$ en el pasa N°40 vs. Equivalente de arena.	72
Cuadro 30. Relación %<74 $\mu\text{m}$ en el pasa N°200 vs. Equivalente de arena.	72
Cuadro 31. Relación valor de azul pasa N°40 vs. Equivalente de arena.	74
Cuadro 32. Relación de equivalente de arena vs. Valor de Azul pasa N°40.	74
Cuadro 33. Relación de equivalente de arena vs. Índice de grupo.	75
Cuadro 34. Relación de superficie específica con el valor de azul.	76
Cuadro 35. Relación de superficie específica, el valor de azul pasa	76

Nº200 y el limite liquido.

Cuadro 36. Relación de superficie especifica con valor de azul pasa Nº325. 77

Cuadro 37. Relación de algunos índices de los suelos analizados. 77

Cuadro 38. Resultados de los índices evaluados de los suelos en estudio. 78

Cuadro 39. Clasificación de los materiales por los sistemas analizados. 79



## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Curva granulométrica típica.	18
Figura 2. Unidades elementales.	20
Figura 3. Diagramas de bloques equivalentes.	20
Figura 4. Carta de plasticidad de Casagrande.	31
Figura 5. Forma de una partícula de azul de metileno.	33
Figura 6. Carta de plasticidad para el sistema AASHTO.	42
Figura 7. Distribución de suelos arenosos y gravosos.	44
Figura 8. Separación de suelos granulares arcillosos y limosos.	44
Figura 9. Clasificación de suelos no orgánicos.	45
Figura 10. Clasificación propuesta para suelos finos.	45
Figura 11. Fotografía de los suelos seleccionados.	48
Figura 12. Fotografía del equipo para límites.	49
Figura 13. Fotografía del equipo de equivalente de arena.	50
Figura 14. Fotografía del equipo de Hidrómetro.	50
Figura 15. Fotografía del equipo de gravedad específica.	51
Figura 16. Fotografía del aparato de Blaine.	52
Figura 17. Fotografía del equipo de azul de metileno.	53
Figura 18. Fotografía de los tubos resultantes del ensayo de azul de metileno. Suelo gris.	53
Figura 19. Fotografía del equipo Harvard Miniatura.	54

Figura 20. Fotografía del montaje para susceptibilidad al agua.	55
Figura 21. Granulometría por Hidrómetro de los suelos analizados.	61
Figura 22. Granulometría total de los suelos analizados.	62
Figura 23. Incrementos de humedad vs. Valor de Azul.	67
Figura 24. Limite líquido vs. Valor de Azul.	68
Figura 25. Porcentaje <math><2\ \mu\text{m}</math> de la fracción pasa N° 40 vs. Índice de plasticidad.	70
Figura 26. Porcentaje <math><2\ \mu\text{m}</math> de la fracción pasa N° 40 vs. Valor de Azul.	71
Figura 27. Cantidad de arcilla pasa N° 200 vs. Valor de Azul.	72
Figura 28. Porcentaje <math><2\ \mu\text{m}</math> en el pasa N° 40 vs. Equivalente de arena.	73
Figura 29. Porcentaje <math><74\ \mu\text{m}</math> vs. Equivalente de arena.	73
Figura 30. Valor de azul vs. Equivalente de arena.	74
Figura 31. Equivalente de arena vs. Valor de Azul pasa N° 200.	75
Figura 32. Relación índice de grupo vs. Equivalente de arena.	76
Figura 33. Actividad de Skempton vs. Superficie específica.	77
Figura 34. Valor de azul vs. Índice de Plasticidad.	78

## GLOSARIO

**ACICULAR:** En forma de aguja, de forma larga muy delgada y puntiaguda como las hojas de los pinos.

**ADSORCIÓN:** Dentro de los fenómenos superficiales de importancia se encuentra el de adsorción: cuando un compuesto en fase gaseosa o disuelto (adsorbato) entra en contacto con una superficie sólida (adsorbente), parte del mismo se une a la superficie, formando una o más capas de moléculas asociadas al adsorbente. La adsorción que frecuentemente se confunde se confunde con la absorción, hace referencia a la adhesión de moléculas de gases o líquidos a la superficie de sólidos porosos. La adsorción es un fenómeno de superficie; la absorción es una mezcla o interpenetración de dos sustancias.

**ADSORBATO:** Sustancia adsorbida en la superficie de un adsorbente.

**ADSORBENTE:** Sustancia con una gran capacidad de adsorción, sobre cuya superficie se adhiere el adsorbato, el adsorbente suele tener estructura porosa.

**AFINIDAD:** Tendencia de los átomos, moléculas o grupos moleculares, a combinarse entre sí: afinidad electrónica.

**ÁLCALI:** Los álcalis son óxidos., hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos. Son bases hidrosolubles.

**ANION:** Ión con carga eléctrica negativa.

**CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO:** La capacidad de intercambio catiónico, es el número total de cationes que un suelo puede retener.

**CATIÓN:** Ión con carga eléctrica positiva. Los cationes más comunes del suelo son: calcio, magnesio, sodio, potasio.

**COHESIÓN:** Fuerza debida a atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte y la atracción de masas por las fuerzas de Van der Waals, por otra (Gavande), 1976 la cohesión, resumiendo, es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

**COLOIDES:** La función que cumplen los coloides del suelo es atraer cationes y retenerlos, esto debido a que en el proceso de formación los coloides desarrollan una carga negativa y como un imán atraen el polo opuesto o sea cationes. Los coloides son los responsables principales de la reactividad química del suelo.

**ELECTROLITO:** Cuerpo que en estado líquido o en disolución puede ser descompuesto por una corriente eléctrica.

**FISOSORCION:** Las fuerzas de adsorción física son fácilmente reversibles y suele estar causadas por energía electrostática y/o condensación, un claro ejemplo serían dos imanes con polaridades opuestas, otro ejemplo de esta sería cuando una sustancia, generalmente un gas, se adhiere a otra (generalmente un sólido).

**HIDRÓMETRO:** Instrumento para medir densidad de líquidos con sólidos en suspensión. Se utiliza como medio para evaluar velocidad de sedimentación.

**MENISCO:** Superficie libre, cóncava o convexa, del líquido contenido en un tubo estrecho.

**METEORIZACIÓN:** Erosión, alteración o descomposición de una roca por la acción de los agentes atmosféricos: una de las causas de meteorización son los cambios bruscos de temperatura.

**NOCIVIDAD:** Se refiere a la respuesta que presenta un suelo al entrar en contacto con el agua. Si sus propiedades se ven afectadas considerablemente se dice que este suelo es nocivo (dañino).

**QUIMISORCION:** Está asociada a reacciones químicas entre dos o más compuestos. Este tipo de adsorción es difícilmente reversible y se necesita algún tipo de catalizador que separe las capas de moléculas que se han generado en el proceso.

## INTRODUCCION

La prueba de Azul de Metileno fue desarrollada en Francia hace aproximadamente dos décadas. Tiene como finalidad evaluar las características de partículas finas presentes en un suelo. Para la definición del Valor de azul (VA) se tiene en cuenta, las principales características de los finos nocivos, (minerales arcillosos) como son la presencia de cargas eléctricas negativas en su superficie, la elevada capacidad de intercambio catiónico y las altas superficies específicas, cualidades que se pronuncian entre más nocivos sean los minerales arcillosos.

La definición de valor de azul de metileno, gramos de azul que pueden ser adsorbidos por una cantidad de cien gramos (100g.) de suelo, buscó proporcionar a la geotecnia y particularmente a la ingeniería de pavimentos una herramienta de evaluación de los finos, conceptualmente bien definida, que permitiera calificar con precisión todo el campo de los finos, dado que los índices tradicionalmente utilizados presentan dificultad, como el índice de plasticidad con los suelos muy poco plásticos y el equivalente de arena no permite diferencia entre los arcillosos y muy arcillosos.

Es propósito de este trabajo estudiar la prueba normalizada por INVIAS, analizar la consistencia de los resultados realizándola como esta establecida y con algunas variaciones que se consideraron podrían mejorar los resultados disminuyendo su variabilidad, además se pretende detallar el significado y utilidad en arenas del método “azul de metileno” como indicador de la presencia de arcillas, que permita la calificación del agregado fino para su uso en la ingeniería de pavimentos. Además se busca comparar desde el punto de vista de la efectividad para calificar los finos presentes en un suelo, el resultado de la prueba de Azul de Metileno con índices convencionales como el índice de plasticidad, el índice de grupo, el equivalente de arena y la actividad.

Se han considerado cuatro muestras de suelos con diferentes índices de plasticidad, que cubrieran desde el campo de los suelos no plásticos hasta el de los muy plásticos. Seguidamente se caracterizaron utilizando los métodos convencionales, hidrómetro (pasante de malla No200), granulometría por tamizado (retenido malla No200), equivalente de arena, límites de Atterberg, índice de grupo AASHTO, superficie específica método de Blaine, con la prueba de azul de metileno normalizada y con las variantes propuestas en este estudio y su evaluación de la sensibilidad al agua y potencial expansivo de los cuatro suelos considerados.

A pesar de contar con resultados de varios trabajos de investigación con objetivos similares en este momento hay dos circunstancias particulares que justifican este trabajo, estas son:

- En el año 2000 INVIAS incorpora el Valor de Azul entre las especificaciones de calidad de los materiales para mezcla asfáltica en caliente y el país no cuenta con una sólida experiencia en su ejecución, por lo que es importante profundizar en la realización e interpretación de los resultados, para entregar a la comunidad dedicada a los pavimentos recomendaciones prácticas que faciliten su aplicación.
  
- Debido al incremento en la demanda de este tipo de prueba y la sensibilidad de la misma ó variaciones en el procedimiento detectadas por los geotecnólogos vinculados a los laboratorios de la Universidad del Cauca, es pertinente efectuar este trabajo que según lo previsto proporcionará resultados que aclaren y llenen los vacíos detectados en la prueba.

## MARCO TEORICO

Los suelos son conjuntos de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes. El conjunto de partículas presenta dos propiedades esenciales:

- El conjunto posee una organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En general, en los vectores de las propiedades, verticalmente ocurren cambios mucho más rápidos que horizontalmente.
- La organización de las partículas minerales es tal que el agua, que como se sabe está presente en todo suelo en mayor o menor cantidad, puede, si hay la suficiente, tener “continuidad”, en el sentido de distribución de presiones. El agua no ocupa huecos aislados, sin intercomunicación; puede llenar todos los poros que dejan entre sí las partículas minerales y que se intercomunican, de manera que el agua forma una masa continua que contiene al mineral en su seno.

Los suelos pueden ser residuales o transportados, según se les encuentre en el mismo lugar en que se han generado o en lugar diferente. El transporte por aire y agua y la sedimentación en esos dos medios constituyen el mecanismo usual que da lugar a un suelo transportado. Es evidente que la estructuración y la “distribución interna” de las propiedades tienen que ser completamente diferentes en un suelo residual que en un suelo transportado. En el primero, el ataque mecánico y la desintegración química tienden a producir un resultado final que en estructura y disposición recuerda, aunque sea lejanamente, a la roca madre. Los suelos transportados y depositados en aire o agua generan estructuras que están regidas únicamente por los mecanismos propios de la deposición y en nada por disposición, características y condiciones iniciales de la roca original. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

El suelo puede ser clasificado, de una manera general, como sin cohesión o cohesivo o como grueso o fino. Como estos términos son muy generales y cubren una gran gama de propiedades físicas y mecánicas, se requieren precisiones o medios de clasificación adicionales, para determinar la conveniencia de un suelo para propósitos específicos de ingeniería y para tener la capacidad de transmitir esta información a otros en forma comprensible. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Los diversos sistemas de clasificación, usan los tamaños de las partículas para diferenciar las clasificaciones generales de grupo, tales como grava, arena, limo y arcilla; donde estas clasificaciones se dificulta la separación entre limos y arcillas, por lo tanto se apoyan generalmente en los valores de los límites de Atterberg. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Debido a la gran variedad de minerales que pueden estar presentes en el proceso de formación de los suelos, sería ideal examinar su composición mineralógica y su estructura con instrumentos como el microscopio electrónico. En el caso de un estudio de ingeniería geotécnica sobre los depósitos de suelos finos arcillosos, se debería considerar los minerales arcillosos presentes, su proporción y su acomodo, por su importante influencia en el comportamiento del suelo. En los estudios rutinarios se emplean índices, como el índice de plasticidad y se complementa con la medición de la cantidad de minerales arcillosos. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, de Joseph E. Bowles 1982).

Puede definirse un suelo cohesivo como una agregación o colección de partículas minerales que tiene un índice de plasticidad definido por los límites de Atterberg y que forma una masa coherente al secarse, de tal forma que se requiere de una fuerza para separar los granos microscópicos individuales. Los ingredientes necesarios para dar cohesión a un depósito de suelo son los diferentes minerales arcillosos. El grado de cohesión depende de los tamaños relativos y de las cantidades de diversos granos de suelos y materiales arcillosos presentes. Los coloides, a veces llamados polvo de roca, son el subproducto de la abrasión de la roca y no poseen propiedades de los minerales arcillosos aunque el intervalo de los tamaños sea similar. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

El comportamiento de un estrato de suelo frente a cambios en el estado de esfuerzos y en los contenidos de agua, está directamente influenciado por las características físicas y químicas de las partículas y de la estructura que alcancen in situ.

Las partículas de suelo que componen la fase sólida, pueden presentar características altamente variables de unas a otras. Propiedades como su tamaño (granulometría), forma, textura, composición mineralógica, configuración cristalográfica y capacidad de intercambio catiónico, características que pueden ser fundamentales en su comportamiento (Josa 1988).

Las principales características de las partículas de suelo que inciden en el comportamiento de los suelos son las que se describen a continuación:

- **TAMAÑO DEL GRANO**

El tamaño del grano de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que forman la masa de suelos. Como un examen macroscópico de una masa de granos de suelo indica que pocas, si es que existen algunas, de las partículas son redondas y que en consecuencia posean un diámetro, se puede concluir que ésta es una descripción más bien vaga de suelo. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).



El tamaño del grano se determina cerniendo una cantidad de suelo a través de una serie de cribas de aberturas de malla progresivamente más pequeñas desde arriba hacia el fondo de la rima. La cantidad de suelo retenido en un tamiz dado de la rima se denomina uno de los tamaños de grano de la muestra de suelo: De hecho esta operación sólo separa una porción del suelo entre dos tamaños. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Los tamaños de los tamices varían desde aberturas de 101.6mm (4 pulgadas) a 0.037mm (Nº 400). Todas las aberturas son cuadradas; en consecuencia, lo que constituye el diámetro de una partícula de suelo es algo más bien académico, ya que la probabilidad de que una partícula pase por una abertura dada de malla depende tanto de su tamaño como de su orientación con respecto a la abertura de la malla. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Los tamaños de cribas están referidos a las aberturas de malla desde 101.6mm a 6.35mm; después los tamices se designan por números. El uso de tamices de números mayores que el Nº 200 (0.074mm) es impráctico ya que el suelo puede ser cernido a través de este tamaño solamente venciendo algunas dificultades. Esta malla es tan fina, que apenas si empieza a ofrecer resistencia al flujo del agua; el suelo, es evidente, ofrece mayor resistencia a pasar a través de la malla que el agua. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

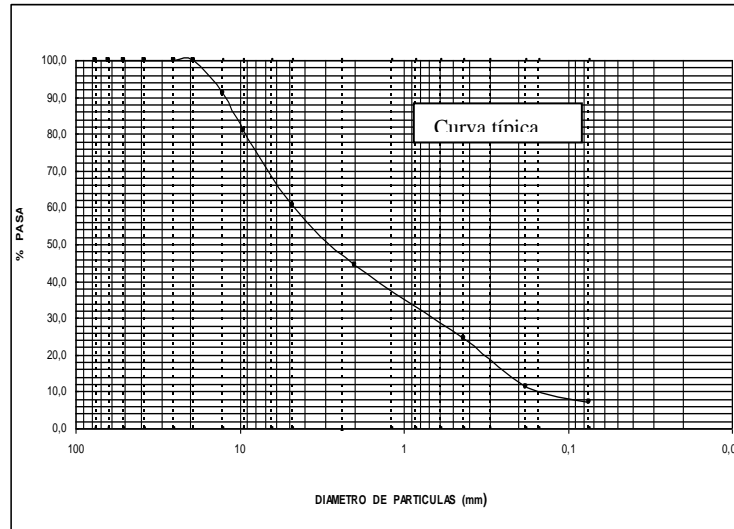
Para determinar aproximadamente los diámetros de partículas menos de 0.074mm, se usa un análisis basado en la velocidad de caída de esferas a través de un fluido viscoso (Ley de Stokes). Un método de utilizar la ley de Stokes consiste en emplear un hidrómetro para medir la gravedad específica de la suspensión agua-suelo, denominado análisis hidrométrico. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

El resultado del análisis del tamaño de las partículas presentes en un suelo es resumido en la granulometría y representado por la curva granulométrica. (Ver Figura 1).

El análisis del tamaño del grano es útil y ayuda a identificar propiedades del suelo tales como:

1. Si un suelo dado puede ser fácilmente drenado.
2. Si el suelo es apropiado para uso en construcción de proyectos, tales como presa, diques, caminos.
3. Levantamiento potencial por heladas.
4. Altura estimada del ascenso capilar.
5. Si puede ser usado en mezclas asfálticas o de concreto hidráulico.
6. Diseño de filtros para prevenir el lavado de material fino de la masa de suelo y su pérdida.

Figura 1. Curva granulométrica típica.



El análisis de tamaño del grano es una parte importante en la mayoría de las clasificaciones de suelos. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

- **FORMA DE LAS PARTICULAS DE SUELO**

La forma de las partículas minerales de un suelo es de importancia primordial en su comportamiento mecánico. En los suelos gruesos la forma característica es la equidimensional, en la que las tres dimensiones de la partícula son comparables. Se origina por la acción de los agentes mecánicos eserción dotes y sólo por excepción corresponde a partículas que hayan sufrido algún ataque químico; puesto que los agentes mecánicos en general no actúan con preferencia por ninguna dirección en especial, es natural que su producto final tienda a la forma esférica. Sin embargo, existen a veces efectos que representan alguna acción que se ejerce preferentemente en una dirección determinada; ejemplo de lo anterior son las formas redondeadas características de gravas y arenas que han sufrido el ataque de ríos o del mar. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

En los granos gruesos de los suelos, las fuerzas de gravitación predominan notablemente sobre cualesquiera otras que pudieran ejercerse entre las partículas; por ello todas las partículas gruesas tienen un comportamiento similar. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

En los suelos finos, producto en general del ataque químico de las aguas a las rocas o a otros suelos, la forma de los componentes tiende a ser aplastada, por lo que los minerales de arcilla adoptan en general la forma laminar, en que dos dimensiones son incomparablemente más grandes que la tercera; como excepción, algunos minerales de arcilla poseen forma acicular, en la que una dimensión es mucho más grande que las otras dos. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Como consecuencia de la forma de sus minerales y de su tamaño, generalmente muy pequeño, en los suelos muy finos ejercen una importante acción, fuerzas de tipo diferente de las gravitacionales; ello es debido a que en estos granos la relación entre el área de su superficie y su peso (superficie específica) alcanza valores de consideración, cobrando mucha significación las fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

- **PRESENCIA MINERALES ARCILLOSOS**

Los minerales arcillosos son, predominantemente, silicatos de aluminio y/o hierro y magnesio. Algunos de ellos también contienen álcalis y/o tierras alcalinas como componentes esenciales. Estos minerales son predominantemente cristalinos y los átomos que los componen están dispuestos en modelos geométricos definidos. La mayoría de los minerales arcillosos tienen estructuras laminares o en capas. Unos pocos tienen estructuras tubulares o fibrosas. Los grumos son como libros de unidades laminares o atados de unidades tubulares o fibrosas. Las masas de suelo generalmente contienen una mezcla de varios minerales arcillosos, identificados por el mineral arcilloso predominante con variados montos de otros minerales no arcillosos. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Los minerales arcillosos son muy pequeños (menos de  $2 \mu\text{m}$ ) y con partículas electroquímicamente muy activas. Los minerales arcillosos exhiben características de afinidad por el agua y de plasticidad no presentada por otros materiales, aunque puedan ser del tamaño de la arcilla o menores. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Hay dos unidades elementales para armar la estructura de los minerales arcillosos. Una es la unidad de sílice, en la que cuatro oxígenos forman las puntas de un tetraedro y encierra un átomo de silicio, produciendo una unidad de  $4.6 \text{ \AA}$  de alto aproximadamente. En la otra unidad está encerrado un átomo de aluminio o magnesio (y a veces Fe, Ti, Ni, Cr ó Li) por seis oxidrilos, que tiene la configuración de un octaedro de alrededor de  $5.05 \text{ \AA}$  de altura. Ver Figura 2.

Figura 2. Unidades elementales.

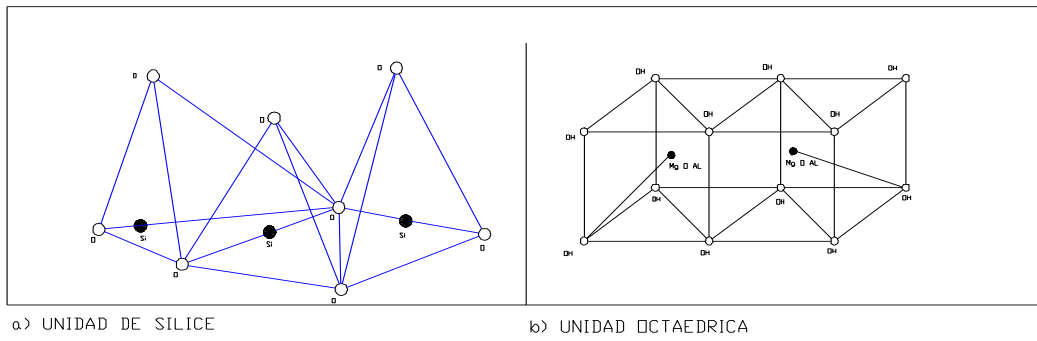
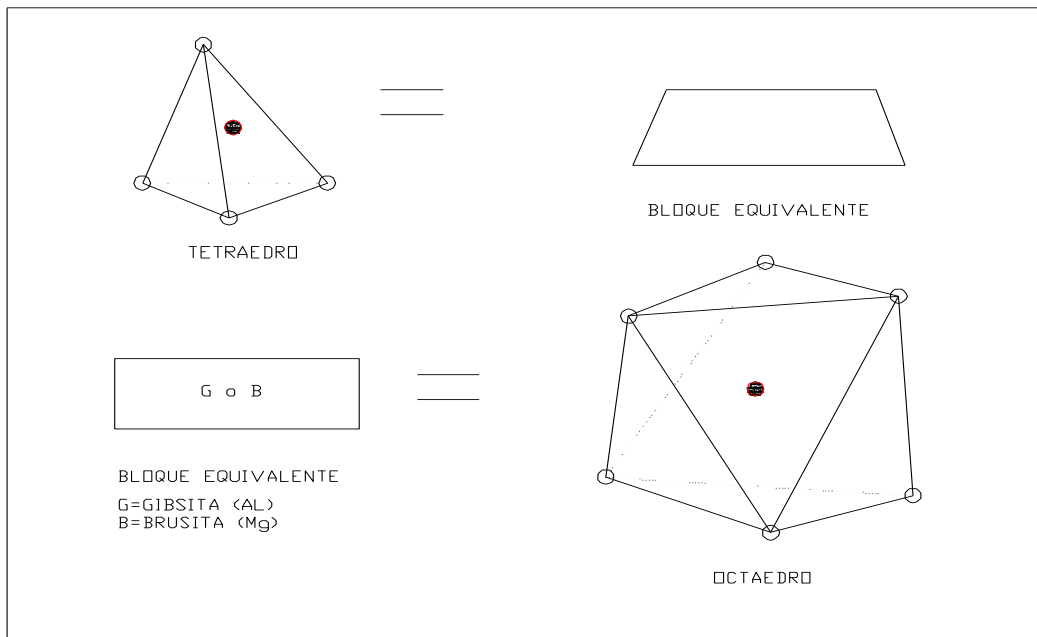


Figura 3. Diagramas de bloques equivalentes.



En la figura 3, se indican los diagramas de bloques equivalentes de estas dos unidades. La unidad octaédrica se llama brucita si el átomo metálico es principalmente magnesio y Gibsita si el átomo es aluminio. Todas las combinaciones posibles de estas unidades básicas para formar minerales arcillosos, producen una carga neta negativa en el exterior de los grumos. Una suspensión de suelo-arcilloso-agua tendrá, en consecuencia, una reacción alcalina (PH>7) a menos que el suelo esté combinado con una sustancia acidificante. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

La principal fuente de minerales arcillosos es la meteorización química de las rocas que contienen:

- Feldespato ortoclásico
- Feldespato plagioclásico
- Mica ( eserción)

Todos los cuales pueden ser catalogados como silicatos complejos de aluminio. Sin embargo existen teorías de que los minerales arcillosos pueden formarse a partir de casi cualquier roca en la medida en que existan suficientes álcalis y tierras alcalinas para efectuar los procesos químicos necesarios. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

La acción de meteorización en las rocas produce un gran número de minerales arcillosos con la propiedad común de afinidad, por el agua, pero en cantidades ampliamente diferentes. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Algunos de los minerales arcillosos más comunes son los siguientes:

#### **(a). Caolinita**

Este mineral está presente en muchos suelos y es el principal silicato de los suelos más antiguos. Cuando se forma en el suelo se presenta en forma de pequeños cristales que varían en forma hexaédrica irregular. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

Una de las propiedades principales de las arcillas es su gran superficie específica como consecuencia del tamaño pequeño de sus partículas. La caolinita es entre las arcillas la de menor superficie activa y sus valores se encuentran entre 15 y 18 m<sup>2</sup>/g de arcilla. Su capacidad de cambio catiónica es baja y varía entre 6 a 10 meq/100g; pocas veces alcanza valores máximos de 25 meq/100g. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

Otro mineral de la familia de la caoinita es la haloisita, siendo este un mineral importante, especialmente en suelos derivados de cenizas volcánicas antiguas. La superficie específica de la haloisita es mayor que la de la caolinita y alcanza valores de más de 40 m<sup>2</sup>/g arcilla. Su capacidad de intercambio catiónico es intermedia de 20 a 25 meq/100g. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

La fórmula resultante es aproximadamente:  $(OH)_8AL_4Si_4O_{10}$

### **(b). Illitas**

Se estima que los minerales de este grupo están presentes en mayor o menor porcentaje en casi todos los suelos de regiones templadas. En muchos suelos son la fuente principal de potasio. El tipo de mineral que se presenta depende en grado apreciable de la roca madre de la cual se ha formado. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

La secuencia de formación es la siguiente:

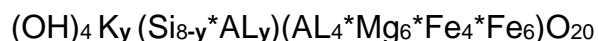
Mica → Illita → Vermiculita → Montmorillonita

La illita es una arcilla común en las regiones de poca o moderada precipitación. Su superficie específica varía entre 80-100 m<sup>2</sup>/g, lo que se debe a su naturaleza no expandible. Su capacidad de cambio catiónico varía de 10 a 40 meq/100g.

En la illita la fijación de potasio es moderada. Presenta uniones en condiciones menos estables que la caolinita y en consecuencia su actividad es mayor. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

La vermiculita es un mineral arcilloso de la familia de la illita, se presenta en todas las fracciones del suelo de arena y arcilla. Tiene una gran capacidad de cambio catiónico de 100 a 150 meq/100g; al humedecerse su expansión es limitada e inferior a la de la Montmorillonita. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

La fórmula resultante es aproximadamente:



En la que **y** está entre 1 y 1.5.

### **(c).. Montmorillonita**

Es un filosilicato dioctaédrico bastante común en el suelo y con cargas relativamente bajas por unidad de superficie, lo que permite la expansión de este mineral al hidratarse.

Por su elevada superficie específica (400 a 800 m<sup>2</sup>/g) y por su gran capacidad de cambio catiónico (80 a 150 meq/100g), la montmorillonita puede retener bien los cationes y sustancias orgánicas. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

La Montmorillonita es el mineral de arcilla dominante en la bentonita, que es una ceniza volcánica alterada, y que tiene la propiedad poco común de aumentar de volumen varias veces cuando es sumergida en agua. (MANUAL DE MINERALOGIA DE DANA de Cornelius S. Hurlbut, JR.0 1984).

### **Propiedades Generales de los Minerales Arcillosos**

La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, por lo menos en sus partes planas (por el contrario, parece haber evidencia de concentraciones de carga positiva en las aristas). La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así, la partícula atrae a los iones positivos del agua que la rodea (H<sup>+</sup>) y a cationes de diferentes elementos químicos existentes en la misma, tales como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Al<sup>+++</sup>, Fe<sup>+++</sup>, etc. Lo anterior conduce, en primer lugar, al hecho de que cada partícula individual de arcilla se ve rodeada de una capa de partículas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida); cuando la partícula atrae cationes de otros elementos químicos, éstos atraen a su vez a otras moléculas de agua orientadas, por lo que el espesor de la película de agua adsorbida por el cristal de arcilla es función no sólo de la naturaleza del mismo, sino también del tipo de los cationes atraídos. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Dada la superficie específica a veces enorme de los cristales de arcilla, las fuerzas eléctricas de superficie juegan un papel mucho más importante que la acción gravitacional. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Las propiedades mecánicas de una arcilla podrán cambiar, por lo tanto, si se hacen variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, de manera que variando éstos puedan tenerse propiedades mecánicas diferentes en la arcilla original. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras,

Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

- **Hidratación:** las partículas arcillosas están casi siempre hidratadas, rodeadas por capas de moléculas de agua llamadas agua adsorbida. Esta agua puede perderse a temperaturas mayores de 60 a 100 °C y reduce la plasticidad natural del suelo. Parte de esta agua puede perderse por secado al aire. Si la deshidratación ocurre a temperaturas mayores, las propiedades de plasticidad se disminuyen permanentemente.

- **Actividad:** los bordes de todos los minerales tienen cargas netas negativas. Esto se traduce en tentativas de balancear las cargas por atracción de cationes. La atracción estará en proporción de la deficiencia neta de carga y puede ser relacionada con la actividad de la arcilla. La actividad definida por Skempton como:

$$\text{Actividad} = (\text{ÍP} / \% < 2 \mu\text{m})$$

En donde el porcentaje de arcilla se toma como la fracción del suelo menor de dos micras (2µm). La actividad está también relacionada con el potencial relativo de contenidos de agua. Los valores típicos de la actividad basados en la expresión anterior se registran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Valores típicos de actividad.

<b>Arcilla</b>	<b>Actividad</b>
Caolinita	0.4 – 0.5
Ilita	0.5 – 1.0
Montmorillonita	1.0 – 7.0

Aunque la actividad está numéricamente definida, una mejor indicación práctica es el límite de contracción. El límite de contracción que es el punto, en términos de humedad, en un proceso de secado a partir del cual cesa el cambio de volumen al perder contenido de agua.

La capacidad de intercambio de cationes, en función de miliequivalentes por 100 g. de arcilla también se usa como indicador de la actividad. La capacidad de intercambio de varios minerales arcillosos se registra en el cuadro 2.



Cuadro 2. Valores de la capacidad de intercambio catiónico de varios minerales arcillosos.

<b>Arcilla</b>	<b>Capacidad de intercambio (meq/100 g)</b>
Caolinita	3 – 15
Haloisita	10 – 40
Illita	10 – 40
Vermiculita	100 – 150
Montmorillonita	80 – 150

- Floculación y dispersión: los minerales arcillosos casi siempre producen suspensiones suelo-agua que son alcalinas (PH>7) característica originada por las cargas negativas en las unidades minerales. Debido a estas cargas, a la presencia de iones H<sup>+</sup> en agua, a las fuerzas de Van Der Waals y a los pequeños tamaños, las partículas tienden a atraerse en colisión cuando están en solución.

- Efectos del agua: la fase acuosa de los suelos arcillosos probablemente no es agua pura, químicamente hablando. Esta agua afecta las propiedades como la plasticidad de la arcilla. El uso de agua destilada, que está relativamente libre de iones, puede producir resultados algo diferentes a los obtenidos cuando se usa un agua más contaminada.

- **PLASTICIDAD**

Plasticidad puede definirse como la propiedad de un material por la que es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse. La anterior definición circunscribe la propiedad a los suelos arcillosos bajo determinadas circunstancias. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no es una propiedad general de todos los suelos, los suelos gruesos no la exhiben en ninguna circunstancia. En segundo lugar, hizo ver que en los suelos finos no es una propiedad permanente, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla o un limo susceptibles de ser plásticos pueden tener la consistencia de un ladrillo, cuando están muy secos; con un gran contenido de agua, pueden presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos existe un intervalo de contenido de agua en el que esos suelos se comportan plásticamente. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Según su contenido de agua decreciente, un suelo remoldeado susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg:

- a. Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- b. Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- c. Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente, según la definición anterior.
- d. Estado semisólido, en que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen si se sigue secando.
- e. Estado sólido, en que el volumen del suelo ya no varía con secado.

(LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando, y no existen criterios estrictos para definir sus fronteras. El establecimiento de éstas ha de hacerse en forma puramente convencional. Atterberg lo hizo originalmente estableciendo las primeras convenciones; Casagrande las refinó posteriormente y les dio su forma actual. La frontera entre el estado semilíquido, que se define en términos de una cierta técnica de laboratorio, consiste en colocar al suelo en una copa de casagrande, formarle una ranura de dimensiones especificadas y ver si la ranura se cierra o no de determinada manera al darle al suelo 25 golpes en la copa, también de un modo estandarizado. El contenido de agua con el que se produce el cierre de la ranura precisamente en 25 golpes es el Límite Líquido; un contenido de agua mayor haría que la ranura se cerrara con menos golpes y el suelo se consideraría en estado semilíquido; por el contrario, un contenido de agua menor haría que la ranura se cerrara con más golpes y el suelo se consideraría, por lo menos en estado plástico. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

La frontera entre el estado plástico y el semisólido se denomina límite plástico. Este es también un determinado contenido de agua, propio de cada suelo, y referido a una prueba en que se hace rolar entre las palmas de las manos un cilindrito de suelo hasta que se agrieta y desmorona; el suelo está en el límite plástico si el desmoronamiento ocurre precisamente cuando el cilindro tiene 3mm de diámetro. Actualmente se utiliza mucho como parámetro de plasticidad el llamado índice plástico. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

$$IP = LL - LP$$

El valor anterior mide de un modo muy claro el intervalo plástico; naturalmente que para situar a éste dentro de la escala general de humedades hace falta otro valor, sea el límite líquido o el límite plástico. Por eso suele decirse que para definir la plasticidad de un suelo hacen falta dos parámetros. El tercer límite o frontera entre estados de consistencia de interés práctico es el límite de contracción, contenido de agua abajo del cual el volumen del suelo ya no disminuye cuando éste se seca. El límite se manifiesta visualmente (y este hecho sirve para una determinación aproximada) por un característico cambio de color de tono oscuro a más claro, producido por una retracción de los meniscos del agua hacia el interior de la masa. En realidad, de todos los límites en uso este es el único que está ligado a un hecho físico significativo y no es puramente convencional. El Límite de Contracción representa dentro del secado gradual el momento en que la tensión capilar alcanza el valor máximo (los meniscos alcanzan su máxima curvatura en los extremos de los canalículos del suelo), de manera que cualquier evaporación posterior produce la retracción del agua hacia el interior del suelo, pero ya a tensión capilar constante (es decir, con curvatura constante en los meniscos). (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

A causa del gran incremento de superficie específica que está ligado en general al tamaño decreciente de las partículas de un suelo, es de esperar que la intensidad del fenómeno de adsorción esté muy influida por la cantidad de arcilla que contenga el suelo. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

La actividad puede valer 0.38 en arcillas Caoliníticas, 0.90 en arcillas Ilíticas y alcanzar valores cercanos a 7 en arcillas Montmorilloníticas, lo cual da idea de las características de plasticidad de las arcillas, según su composición mineralógica. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

Los límites de plasticidad han resultado ser útiles en cuestiones de clasificación e identificación de suelos. También se usan en especificaciones para controlar el empleo de suelos. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

- **ESTRUCTURAS DE LOS SUELOS**

Se denomina estructura de un suelo al arreglo o disposición que adopten sus partículas minerales. Es obvio que la estructuración que tenga un suelo dado juega un papel fundamental en su comportamiento, especialmente en lo que se refiere a resistencia, compresibilidad y permeabilidad. (LA INGENIERIA DE

SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

El problema de la estructuración de los suelos es netamente distinto en los suelos gruesos (de forma equidimensional) y en los finos (generalmente de forma laminar). En los primeros, la aglomeración de partículas se produce únicamente por acción gravitacional; los granos de arena o grava se disponen como las canicas dentro de una caja. El mecanismo de estructuración es fácil de concebir. Por el contrario, en los suelos finos, las fuerzas que definen la estructura son fundamentalmente de naturaleza electromagnética, mucho más difíciles de concebir y, además, existe la dificultad adicional de que cualquier hipótesis de estructuración que se haga no puede ser verificada a simple vista, dado el pequeño tamaño de los cristales, por lo que no es de extrañar que el problema de la estructuración de los suelos finos resulte difícil, controvertible y, en general mucho más complicado que el de los suelos gruesos. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

La estructura típica de un suelo grueso (análoga a la de un agrupamiento de canicas en una caja) recibe el nombre de estructura simple, y su comportamiento mecánico queda fundamentalmente definido por la compacidad. Terzaghi ha propuesto el concepto de compacidad relativa para medir tal condición. La compacidad relativa es determinable en laboratorio. (LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. Alfonso Rico Rodríguez – Hermilo del Castillo 1974).

La descripción completa de la micro estructura de un suelo fino requiere de un conocimiento de las fuerzas interparticulares y del arreglo geométrico o textura de las partículas. Es casi imposible medir los campos de las fuerzas que rodean directamente partículas de arcilla; en consecuencia, la textura es el principal foco en los estudios de suelos finos. De los estudios de la textura, se hacen estimaciones teóricas o tentativas de las fuerzas interparticulares. Las fuerzas entre partículas parecen originarse de tres tipo diferentes de cargas eléctricas:

1. Enlaces iónicos: enlaces debidos a una deficiencia de electrones en las capas exteriores de átomos que componen las unidades básicas del suelo.
2. Enlaces que Van Der Waals: enlace debido a alteraciones en el número de electrones en cualquier instante a un lado del núcleo atómico.
3. Otros. Incluye enlaces de hidrógeno y la atracción gravitacional entre dos cuerpos.

Las primeras descripciones del suelo fino incluían estructuras panaloides, floculentas y dispersas. La estructura panaloide bien puede corresponder a una situación en la que los grumos forman agrupamientos particulares durante la sedimentación. La estructura floculenta puede corresponder a una situación en la

que los granos de limo atraen revestimientos de minerales arcillosos o formaciones de pedones y así producir la estructura floculenta porosa y errática. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Actualmente en los suelos parcialmente saturados se manejan tres grupos de micro estructuras arcillosas, estas son: la matricial, la de partículas de arena y limo con conectores de arcilla y la compuesta por agregado de arcilla. Dependiendo del tipo de estructura de un depósito de suelo, los estratos alcanzan diferentes propiedades sobre todo en lo que respecta al comportamiento al experimentar cambios en el contenido de agua y en los esfuerzos actuantes en los elementos de suelo.

- **INDICES TRADICIONALES PARA EVALUACION DE LA NOCIDIDAD DE LOS FINOS**

1. Límites de Atterberg ( ó de consistencia) e Índice de Plasticidad

- Límite líquido: el contenido de agua por encima del cual el suelo se comporta como un líquido viscoso (una mezcla de suelo-agua con una resistencia al corte no medible). En ingeniería de suelos el límite líquido se define más arbitrariamente como el contenido de agua al cual 25 golpes de la máquina del límite líquido cierran una acanaladura cortada en la pastilla de suelo en una distancia de 1.27 cm. Casagrande y otros han modificado el ensayo inicialmente propuesto por Atterberg, de tal forma que depende menos de la subjetividad del operador y es más reproducible. Con equipo estándar, varios operadores pueden reproducir valores del límite líquido dentro del 1 a 2 por ciento. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982). Se recomienda hacer cuatro determinaciones, entre 12 y 35 golpes, para realizar la curva de fluidez.

- Límite plástico: el contenido de agua por debajo del cual el suelo se comporta ya como un material plástico. Es en el intervalo de contenidos de agua entre el límite líquido y el límite plástico cuando el suelo se comporta como un material plástico. Este intervalo se denomina índice de plasticidad o índice plástico. Por la definición del  $I_p$  es imposible obtener un valor negativo. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982). El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Cuanto más sean las partículas susceptibles de retener agua adsorbida, más es el  $I_p$ , y es por ello que crece con la superficie específica y la capacidad de intercambio de iones. Por debajo de 5 el índice plástico pierde toda precisión hasta considerársele no medible o no plástico. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996). El estado plástico, se toma suelo que en la cazuela de Casagrande requieran 50 golpes, por lo menos más de 25 golpes.

El límite plástico también se define arbitrariamente como el contenido de agua al cual se agrieta o rompe un cilindro de suelo cuando se lo enrolla a un diámetro de 3 mm. Este ensayo está más sometido a la subjetividad del operador que el ensayo de límite líquido, pero la experiencia indica que los resultados son reproducibles dentro de 1 a 3 por ciento. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

- Límite de Contracción: el contenido de agua, definido como la humedad para un grado de saturación de cien por ciento ( $w_s=100$ ), bajo el cual no ocurre un cambio posterior de volumen del suelo al experimentar un secado adicional. Este límite es de considerable importancia en zonas áridas y para ciertos tipos de suelo, que sufren cambios apreciables de volumen al variar el contenido de agua. Se debe observar que cuanto más pequeño es el límite de contracción, más susceptible es el suelo al cambio de volumen, es decir, a menor límite de contracción menos agua se requiere para iniciar el cambio de volumen del suelo. Si el límite de contracción es de cinco por ciento (5%), entonces, cuando el contenido de agua in situ excede este valor, el suelo comienza a expandirse. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982). La capsula con suelo se lleva con humedad aproximada a la del límite líquido para garantizar la saturación total de la muestra de suelo.

El valor de los límites depende de la composición mineralógica, espesor del agua adsorbida y los cationes de intercambio.

Carta de Plasticidad: utiliza el límite líquido y el límite plástico.

- Línea "A":  $IpA = 0.73 * (LL-20)$ . Está línea divide los suelos en limos o arcillas. En general los suelos sobre la línea A son arcillosos BALIEN y todos los suelos debajo de la línea A son limos (M). Cuando el suelo tiene  $Ip = IpA$ , el suelo es de doble símbolo. Sobre los ubicados encima se la línea A se tiene unas excepciones, las fronteras quedan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Fronteras de la carta de plasticidad.

C	$Ip > IpA$ y	$Ip > 7$
M	$Ip < IpA$ o	$Ip < 4$
M – C	$Ip > IpA$ y	$4 < Ip < 7$

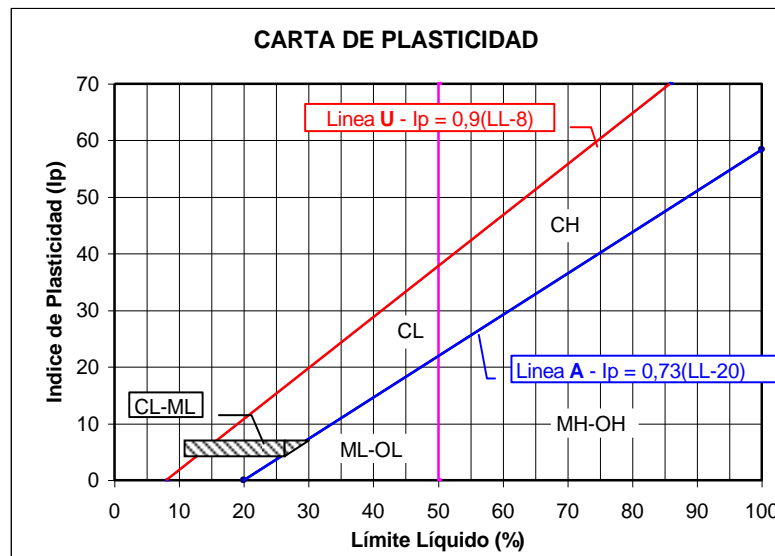
- Línea "B": línea vertical trazada por límite líquido = 50. Divide los suelos de baja y alta compresibilidad. Ver Cuadro 4.

Cuadro 4. Parámetros de compresibilidad.

Baja compresibilidad	LL < 50	L
Alta compresibilidad	LL > 50	H

- Línea "U":  $I_{pu} = 0.9 (LL - 8)$ , enmarca los suelos encontrados en la tierra, están por debajo.

Figura 4. Carta de plasticidad de Casagrande.



El suelo es orgánico si:  $(LL \text{ seco al horno} / LL \text{ normal}) \leq 0.75$ .

- Equivalente de arena:

Este ensayo propuesto por F. Hveen en 1950 es un ensayo simple. Se realiza sobre una muestra de arena de 120 g. la cual se introduce en una probeta que contiene una solución floculante normalizada. La solución esta formada básicamente con cloruro de calcio que es un material floculante, se le añade algo de glicerina la cual produce un efecto estabilizante y una porción de formaldehído cuyo objeto es esterilizar la solución. Después de agitar la probeta se deja sedimentar durante 10 minutos. La fracción arenosa se deposita en el fondo de la probeta mientras que las partículas finas y floculadas se ubican en la parte superior. Así el equivalente de arena expresa una relación volumétrica convencional entre la fracción arenosa y los finos.

$$EA (\text{equivalente de arena}) = 100 * (\text{lectura de arena} / \text{lectura de arcilla})$$

Si bien el valor de equivalente de arena puede darnos una idea del contenido de partículas arcillosas, el ensayo depende directamente del contenido de finos y del tamaño de sus partículas.

Para un porcentaje bajo de finos, este ensayo es representativo ya que el comportamiento presenta una buena relación lineal. Cuando el contenido de finos es elevado (EA inferior a 40 ó 35) el ensayo no es representativo pues los elementos coloidales tienden a aglomerarse formando partículas de mayor tamaño que se precipitan, presentando la prueba un valor de equivalente de arena mayor del real, puesto que esta aglomeración la considera como arena y no como coloides. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

- El índice de grupo en el sistema AASHTO

Para establecer la posición relativa de un suelo dentro de un subgrupo y calificar los dos aspectos que más inciden en la nocividad de los materiales, tanto en tipo como en cantidad de finos se desarrolla el índice de grupo. El índice de grupo es una función del porcentaje de suelo que pasa la malla N° 200 y de los límites de Atterberg. El índice de grupo se representa por la siguiente ecuación:

$$IG = 0.2 a + 0.005 a c + 0.01 b d$$

Donde:

a = la parte del porcentaje que pasa la malla N° 200 mayor de 35 y sin exceder 75, expresada como un número entero (intervalo = 1 a 40).

B = la parte del porcentaje de pasa la malla N° 200 mayor de 15 y sin exceder 55, expresada como un número entero (intervalo = 1 a 40).

C = la parte del límite líquido mayor de 40 y no mayor de 60, expresada como un número entero (intervalo = 1 a 20).

D = la parte del índice de plasticidad mayor de 10 y sin exceder 30, expresada como un número entero (intervalo = 1 a 20).

(PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

El índice de grupo debe ser redondeado a número entero más cercano. En general, cuanto mayor sea el índice de grupo, menos deseable es el suelo dentro del subgrupo para su empleo en construcción de carreteras. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

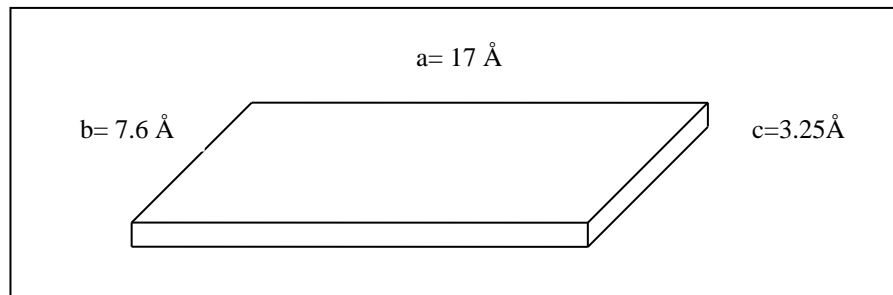


- **INDICE NO TRADICIONAL PARA EVALUAR EL GRADO DE NOCIDIDAD DE LOS FINOS, EL VALOR DE AZUL DE METILENO.**

El azul de metileno es un electrolito catiónico de origen orgánico, cuyas características de adsorción por minerales arcillosos se utilizan para la medición de capacidades de intercambio catiónico como superficies específicas del conjunto de partículas que conforman la fase sólida de un suelo. El azul presenta las siguientes propiedades fisicoquímicas:

- Forma:

Figura 5. Forma de una partícula de azul de metileno.



b. El área proyectada de la molécula es del orden de 130 a 135 Å.

c. La forma tri-hidratada de azul de metileno es inestable.

d. Para un PH 29.5 en azul de metileno es inestable.

- En solución acuosa, los iones de azul pueden existir en equilibrio en la forma  $AM^+$  o  $(AM^+)_2$ , la constante de disociación es de  $2 \cdot 10^{-4}$  iones g/l.

(ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

Por descripción son cristales prismáticos de color verde oscuro, con brillo bronceo o polvo cristalino de aspecto verde bronceo; inodoro o con ligero olor; inalterable al aire. Su nombre químico es cloruro de metiltioninio. Generalmente es usado como antiséptico, desinfectante y en este caso como indicador.

La prueba de azul de Metileno es fundamentalmente de adsorción, se llama adsorción al fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie. La sustancia que se adsorbe es el azul de metileno (adsorbato) y el material sobre el cual lo hace es el suelo (adsorbente). El proceso inverso de la adsorción es la desorción. Las partículas de suelo que tienen esta propiedad son las de los

minerales arcillosos, los tipos de arcillas más comunes son: Montmorillonita, Caolinita e Illita. Las unidades cristalinas que las conforman están basadas en silicatos-aluminio hidratados. Todas las arcillas tienen un grado de adsorción debido a la capacidad de intercambio catiónico la cual esta relacionada con la conformación y estructura de sus cristales, precisamente por ello se aprovecha la capacidad de adsorción del azul de metileno (un indicador catiónico) de una solución acuosa.

La cantidad adsorbida depende en gran medida de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido a la superficie del suelo y del tratamiento al que se someta a la superficie del azul de metileno, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida. Por tanto es de esperar que al tener una gran superficie de suelo la cantidad adsorbida aumente.

La adsorción se da de manera rápida y la velocidad aumenta cuando aumenta la temperatura, pero desciende cuando aumenta la cantidad adsorbida.

Son muchos los tipos de adsorción existentes (sólido-gas, sólido-líquido, líquido-gas), pero en nuestro caso se ceñirá al estudio de la adsorción sólido-líquido. Los sólidos son capaces de adsorber uno o más componentes de una mezcla líquida, o bien el soluto o el disolvente de una solución.

Atendiendo a las fuerzas de interacción entre las moléculas de suelo (adsorbente) y azul de metileno (adsorbato), se acepta la existencia de dos tipos fundamentales de adsorción. Cuando estas fuerzas son del tipo dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión, se usa el término de adsorción física o fisisorción. Cuando las fuerzas son enlaces covalentes se aplica el término de adsorción química o quimisorción. La adsorción física es la más frecuente, mientras que la quimisorción se manifiesta, únicamente, cuando el adsorbente y el adsorbato tienden a formar un compuesto.

La capa adsorbida en la adsorción física puede variar en espesor, desde una molécula a muchas moléculas, debido a que las fuerzas de Van der Waals se pueden extender desde una capa de moléculas a otras.

En cambio, la quimisorción no puede, por sí misma, dar lugar a una capa de más de una molécula de espesor, debido a la especificidad del enlace entre el adsorbente y el adsorbato. Sin embargo, cabe que capas subsiguientes de varias moléculas puedan estar físicamente adsorbidas sobre la primera capa.

A temperatura constante, la cantidad adsorbida aumenta con la concentración de azul de metileno (adsorbato).

## **Ensayo de Azul de Metileno**

Los minerales arcillosos, responsables de la actividad de los suelos finos, poseen en su superficie carga eléctrica negativa y presentan a su vez grandes superficies específicas, siendo más importantes entre más nocivos sean los minerales. Por lo tanto los suelos finos que en su composición tengan minerales arcillosos tiene la tendencia a adsorber cationes del medio adyacente, tratando de alcanzar el equilibrio eléctrico.

**Esta propiedad se utiliza para identificar la actividad coloidal de los minerales arcillosos o su superficie específica. Para ello se usan electrolitos previamente conocidos y dosificados de tal manera que sea posible determinar la cantidad de electrolitos adheridos a la superficie mineral, como en el caso del azul de metileno.** (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

El método se basa en las propiedades de adsorción de las arcillas, y su consiguiente efecto decolorante sobre las soluciones acuosas de azul de metileno. El azul de metileno es adsorbido preferentemente por las arcillas, los materiales orgánicos y los hidróxidos de hierro, siendo esta capacidad de adsorción consecuencia de la actividad superficial y físico-química de estos materiales. (NORMA: NLT-171/90).

El valor de Azul de Metileno es utilizado como parámetro para clasificar la nocividad del material fino presente en materiales utilizados en la construcción de carreteras.

El procedimiento descrito en la norma I.N.V.E-235 (anexo F), se describe a continuación:

a). El ensayo se realiza sobre una muestra de suelo seca al horno pasante del tamiz N° 40 (UNE 400um), se pesan 2 g. de suelo y 0.05 g. de azul de metileno, se colocan en un vaso con agua destilada hasta conseguir un volumen de 150cc. La solución obtenida será de un color azul intenso. Este volumen de 150 cc. Debe mantenerse constante durante todo el proceso, restituyendo con agua destilada o desmineralizada las pérdidas sufridas que se ocasionen.

b). Se coloca el vaso sobre un agitador electromagnético, se introduce el imán, se tapa con el vidrio de reloj y se pone en marcha el agitador durante 20 minutos. Se conecta a la vez el interruptor de calefacción, y se regula para que en ese periodo de tiempo la solución alcance una temperatura de 60 °C.

c). Transcurrido este tiempo, se toman en un tubo de ensayo 3 cc. de la suspensión del vaso, se coloca el tubo con la suspensión en la centrifuga y se

centrifuga durante 30 s. a 5000 rpm. A continuación se transvasan 2 cc. del líquido que sobrenada a otro tubo de ensayo limpio, tubo 1, se observa su color y se coloca en la gradilla mientras dure el ensayo.

d). El tubo de ensayo de ensayo utilizado en la centrifugación se lava con otros 2 cc. de agua destilada o desmineralizada, agitándolo con la mano y vertiendo todo su contenido en el vaso de precipitado, con objeto de recuperar la muestra que había en el fondo del tubo después de la centrifugación.

e). El líquido transvasado al tubo 1 puede presentar coloración azul más o menos intensa o quedar incoloro:

- En el caso que presente coloración, se vuelve a colocar el vaso en el agitador durante otros 20 minutos, y se repite posteriormente la operación según el apartado c. Se compara su coloración, tubo 2, con la del tubo 1, situado en la gradilla. Si la coloración es la misma hay que añadir la misma cantidad de muestra siguiendo el criterio referido en el apartado g. y se repite todo el proceso indicado en los apartados c,d y e. Se considerara terminado el ensayo cuando la solución llega gradualmente a ser incolora.
- En el caso en que el líquido transvasado al tubo 1 resulte incoloro, se pesaran otros 0.05 g. de azul de metileno, se añadira al vaso que contiene la muestra y se vuelve a repetir el proceso completo según los apartados b y siguientes.

f). La escala comparativa de colores se obtiene por diferentes dilosuciones de azul de metileno en agua destilada.

g). Como orientación a la cantidad de muestra a añadir se puede seguir el siguiente criterio:

- Con coloración 5 y 4 de 2 a 1 g.
- Con coloración 3 y 2 de 1 a 0.5 g.
- Con coloración inferior a 2, de 0.5 a 0.1 g.

El ensayo de azul de metileno nos permite medir la capacidad de adsorción del azul por los materiales arcillosos, materia orgánica e hidróxidos de hierro variando dicha capacidad según la superficie específica del suelo evaluado.

Se entiende por “valor de azul” como la cantidad en gramos de azul adsorbidos por cada 100 g. de finos.

- **CLASIFICACION DE SUELOS UTILIZANDO LOS DIFERENTES INDICES Y TENIENDO COMO REFERENCIA LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS.**

El suelo puede ser clasificado, de una manera general, como sin cohesión o cohesivo o como grueso o de grano fino. Como estos términos son muy generales y cubren una gran de propiedades físicas y de ingeniería, se requieren precisiones o medios de clasificación adicionales, para determinar la conveniencia de un suelo para propósitos específicos de ingeniería y para tener la capacidad de transmitir esta información a otros en forma comprensible. Del gran número de sistemas propuestos, el Sistema Unificado de Clasificación basado en el trabajo de Casagrande y el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), son ampliamente usados en el mundo. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Los diversos sistemas de clasificación que han sido propuestos, usan los tamaños de las partículas para diferencia las clasificaciones generales de grupo, tales como grava, arena, limo y arcilla. Por lo general, los límites de Atterberg también forman parte del proceso final de clasificación, en especial para trabajos de ingeniería. (PROPIEDADES GEOFÍSICAS DE LOS SUELOS, Joseph E. Bowles 1982).

Un sistema de clasificación le permite a uno aprovechar la experiencia en ingeniería adquirida por otros. El uso de un sistema de clasificación no elimina la necesidad de estudios detallados de suelos o de ensayos para determinar las propiedades de ingeniería.

A continuación se describen y comparan los sistemas de clasificación más utilizados, los cuales se apoyan en los índices evaluados en este trabajo:

### **1. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos:**

Los grupos principales de suelos de esta clasificación aparecen en el cuadro 5. Como se muestra en el cuadro, bajo el encabezamiento "Símbolos de grupo" los suelos son designados por símbolos de grupo consistentes en un prefijo y un sufijo.

Los prefijos indican los tipos principales de suelos y los sufijos indican las subdivisiones entre grupos.

Cuadro 5. Nomenclatura USCS

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradado	W
Arena	S	Pobrementemente gradado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	LL < 50 %	L
Turba	Pt	LL > 50 %	H

- Datos requeridos:

(a). Granulometría: % retenido en el tamiz N° 4, % pasa N° 200, gradación ó distribución de tamaños.

(b). Límites realizados al suelo pasa N° 40, con humedad natural como humedad inicial. LL, LP, IP.

(c). Carta de plasticidad.

- Grupos de suelos:

(a). Dividir en dos grandes grupos con base en el % pasa N° 200, cuadro 6.

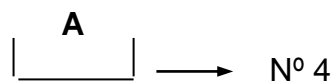
Cuadro 6. División de grupos.

Suelo grueso	% pasa No200 < 50
Suelo fino	% pasa No200 ≥ 50

(b). Los suelos gruesos los divide en dos grupos, con base en la información de los tamices N°4 y N°200.

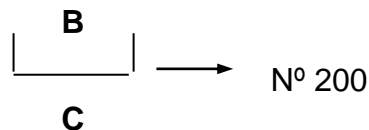
Gravas "G", más del 50 % fracción gruesa queda retenida en la malla N° 4.

Fracción gruesa: % retenido en el N° 200; fracción de grava más fracción de arena.



A: fracción de grava = % retenido N° 4

B: fracción de arena = % pasa N° 4 - % pasa N° 200



C: fracción de suelo fino = % pasa N° 200

Grava : A > B - Arena : A < B

(c). Las gravas y las arena las divide en: limpias, sucias e intermedias.

- Limpia: gravas y arenas están en contacto. Se encuentran afectados por la granulometría.
- Sucia: las partículas granulares están embebidas en una matriz de suelo fino. Su comportamiento esta altamente influenciado por las características de la matriz. Su comportamiento no es afectado por la granulometría, el comportamiento depende del tipo de finos.
- Intermedia: mejor comportamiento mecánico. Tanto la granulometría como el tipo de finos afectan el comportamiento mecánico.

Cuadro 7. División de las arenas.

Limpias	% pasa N° 200 < 12
Sucias	% pasa N° 200 ≥ 12
Intermedias	5 ≤ pasa N° 200 < 12

Si las gravas y las arenas son **limpias** se dividen en: bien gradadas y mal gradadas.

- Serán bien gradadas:

Cuadro 8. Parámetros para definir suelos gruesos bien gradados.

Gravas	GW	$Cu > 4$	$1 < Cc < 3$
Arenas	SW	$Cu > 6$	$1 < Cc < 3$

- Serán mal gradadas si no cumplen algunas de las condiciones anteriores. GP y SP.

Si las gravas y las arenas son **sucias** se dividen en gravas y arenas limosas ó arcillosas.

Cuadro 9. Parámetros para definir gravas y arenas sucias.

GC ó SC	Arcillosas	$Ip > IpA$ y $IpA > 7$
GM ó SM	Limosas	$Ip < IpA$ ó $Ip < 4$
GM ó GC SM ó SC	Limo arcillosos	$Ip > IpA$ y $A < Ip < 7$

Si son **intermedias**, bien ó mal gradadas y limo ó arcillas. Pueden ser GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC. Es factible que den doble símbolo: GW-M-C, GW-GC-GM, GP-GC-GM.

(d). Si los suelos clasifican como finos se utiliza la carta de plasticidad para clasificarlos.

## 2. El Sistema AASHTO de Clasificación:

Sistema establecido para ser utilizado fundamentalmente en carreteras y particularmente en pavimentos, sin embargo agrupan de tal manera que puede ser utilizado para cualquier rama de la geotecnia.

Datos requeridos:

- ❖ Granulometría: % pasa N° 10, % pasa N° 40 y % pasa N° 200.
- ❖ Límites realizados al suelo pasa N° 40, con humedad natural como humedad inicial. LL, Lp, Ip.
- ❖ El valor del índice de grupo, (IG)

Este sistema divide a los suelos en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. Considerando que el mejor suelo para ser usado en la subrasante de una carretera es un material bien gradado compuesto principalmente de arena y grava, pero que contenga una pequeña cantidad de excelente cementante arcilloso, a este material se le dio el nombre de A-1. Los suelos restantes se agruparon en orden decreciente de estabilidad. (INGENIERIA DE CIMENTACIONES, Ralph B. Peck, Walter E. Hanson, Thomas H. Thornburn 1982).

Las características de los diferentes grupos y subgrupos, y el procedimiento de clasificación se dan en el cuadro 10. En el sistema de AASHTO los suelos inorgánicos se clasifican en 7 grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de 12 subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8. Cualquier suelo que contenga material fino se identifica además por su índice de grupo; cuanto mayor es el índice, peor es el suelo. (INGENIERIA DE CIMENTACIONES, Ralph B. Peck, Walter E. Hanson, Thomas H. Thornburn 1982).

El índice de grupo refina la clasificación dentro de un grupo y subgrupo, a partir de los suelos A-2-6, . (INGENIERIA DE CIMENTACIONES, Ralph B. Peck, Walter E. Hanson, Thomas H. Thornburn 1982).



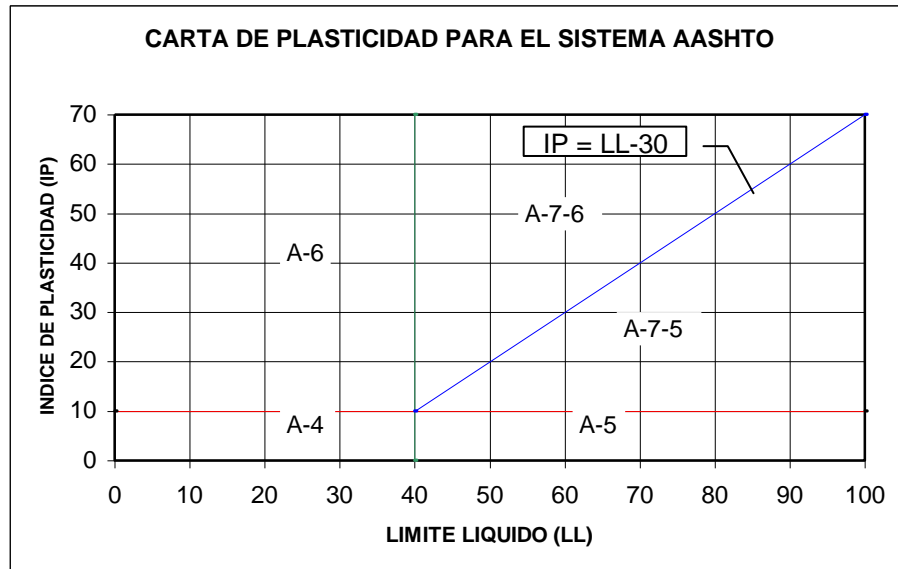
Cuadro 10. Sistema AASHTO de clasificación de suelos.

CLASIFICACION GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% o menos pasa malla N°200)							MATERIALES LIMO-ARCILLOSOS (más del 35 % pasa malla N°200)				
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Tamizado: % que pasa												
200 mm (N°10)	50 máx.											
0.425 mm (N°40)	30 máx.	50 máx.	51 máx.									
0.075 mm (N°200)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características de la fracción que pasa el tamiz 0.425 mm (N°40)												
Límite Líquido				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	
Índice Plástico	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	
Índice de Grupo máx.	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	
Tipos usuales de materiales representativos	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena Limosa y arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Comportamiento general como subrasante.	Excelente a bueno							Regular a pobre				

- a. Procedimiento de clasificación. Teniendo presentes los datos de prueba necesarios, procédase de izquierda a derecha en el cuadro; se encontrará el grupo correcto siguiendo un proceso de eliminación. El primer grupo de la izquierda que corresponda con los datos de la prueba es la clasificación correcta. El grupo A-7 se subdivide en A-7-5 o A-7-6, según el límite plástico. Para  $LP < 30$ , la clasificación es A-7-6; para  $LP > 30$ , A-7-5.
- b. NP, significa no plástico.

Las fronteras utilizadas por este sistema AASHTO para agrupar los suelos limo arcillosos en lo que respecta a LL y al IP se puede resumir en la siguiente carta (figura 6), claro esta que no es la herramienta integral de clasificación porque falta incluir las fronteras del IG.

Figura 6. Carta de plasticidad para el sistema AASHTO.



- **Clasificación Método Francés:**

Clasifica los suelos con base en el Valor de Azul, el Porcentaje de arcilla  $C_2$ , ( $\% < 2\mu\text{m}$ ) y la información granulométrica relacionada con los tamices de  $80\mu\text{m}$  y  $2\text{mm}$ .

Tanto en la plasticidad como en la adsorción de azul intervienen las mismas variables como son la actividad electroquímica de los minerales presentes. Los parámetros y etapas para la clasificación son los siguientes:

- (a) Análisis granulométrico prestando eventualmente atención a los tamaños de grano de 80 micras. Si el porcentaje de este tamaño de partículas es inferior al 50%, no se necesita continuar con la evaluación granulométrica de dicho pasante. Esta operación permite determinar entre otras cosas, lo siguiente:
  - El porcentaje de suelo menor de 2 mm. ( $C_{2000}$ ).
  - El porcentaje de finos ( $C_{80}$ ). ( $\%$  de suelo  $< 80\mu\text{m}$ ).
  - El porcentaje de partículas arcillosas ( $C_2$ ), indispensable para la clasificación de suelos finos; ( $\% < 2\mu\text{m}$ ).
  
- (b). Determinación del valor de azul sobre la fracción 0/80 micras en el caso de suelos granulares, y del valor de azul sobre la fracción 0/400 micras en el caso de suelos finos.

El proceso de clasificación se realiza de la siguiente manera:

- Se determina inicialmente si el suelo es granular o suelo fino ( $C_{80}$  inferior o superior al 50 %).
- Si el suelo es granular, los valores  $C_{2000}$  y  $C_{80}$  le permiten determinar si es una arena o una grava (diagrama 7) y los valores  $C_{80}$  y  $V_a$  (0/80 micras) permiten definir si el suelo es arcilloso o limoso (diagrama 8). Para definir si el suelo es bien o mal gradado se procede de la siguiente manera: si el suelo es fino  $C_2$  y  $V_a$  (0/400 micras) determinarán su nombre (diagrama 9 y 10).

(ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

La clasificación francesa usa el siguiente vocabulario:

- Arcilla poco activa (Apa).
- Arcilla medianamente activa (Ama).
- Arcilla muy activa (Ata).
- Limo poco activo (Lpa).
- Limo medianamente activo (Lma).
- Limo muy activo (Lta).
- Arena (S)
- Grava (G)
- Arena Limosa (SL)
- Arena Arcillosa (SA)
- Arena bien gradada (Sb)
- Arena mal gradada (Sm)
- Grava Limosa (GL)
- Grava Arcillosa (GA)
- Grava bien gradada (Gb)
- Grava mal gradada (Gm)

Se disponen de los siguientes diagramas (figura 7, 8, 9 y 10) para clasificar geotécnicamente los suelos no orgánicos, sin determinar los límites de Atterberg.

Figura 7. Distribución de suelos arenosos y gravosos.

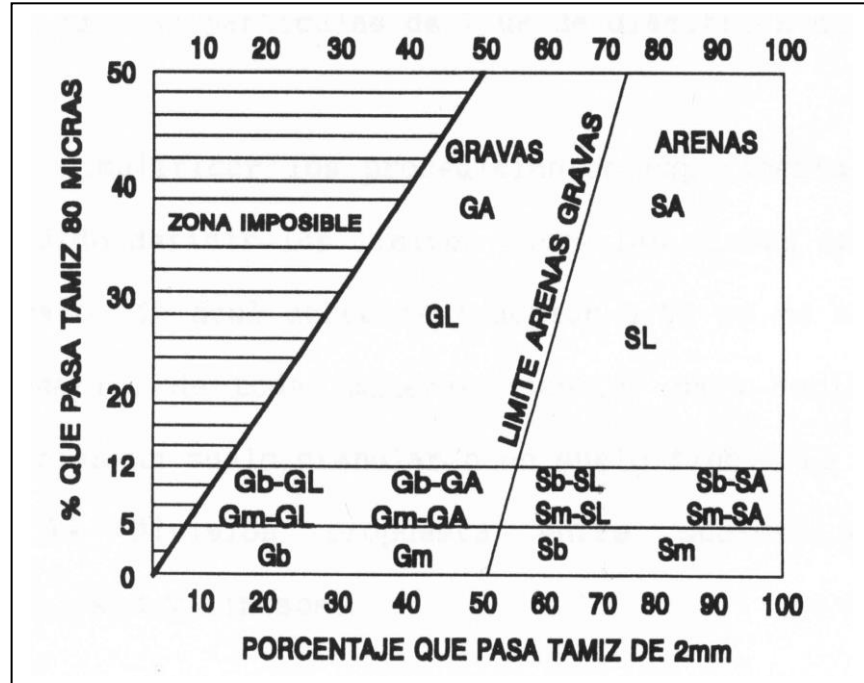


Figura 8. Separación de suelos granulares arcillosos y limosos.

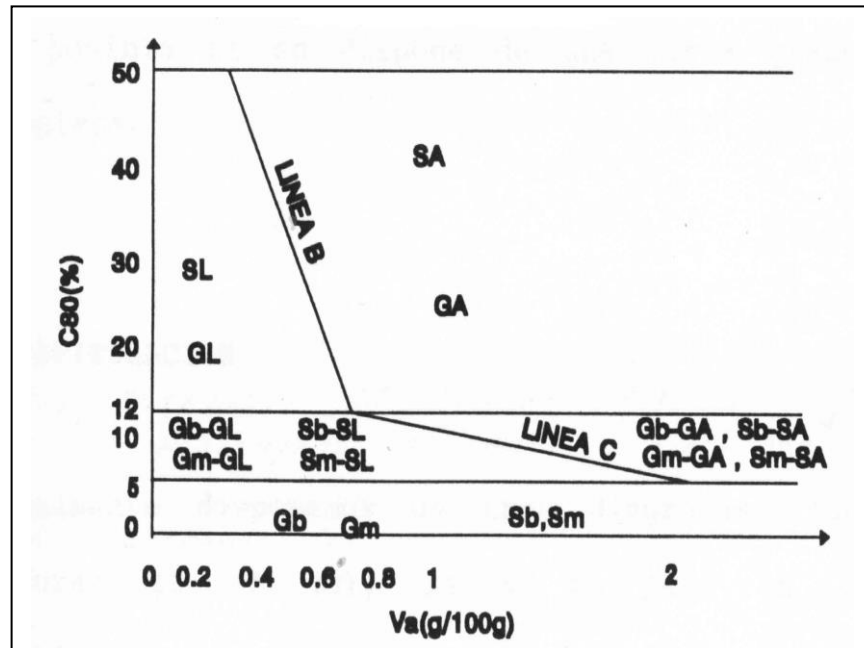


Figura 9. Clasificación de suelos no orgánicos.

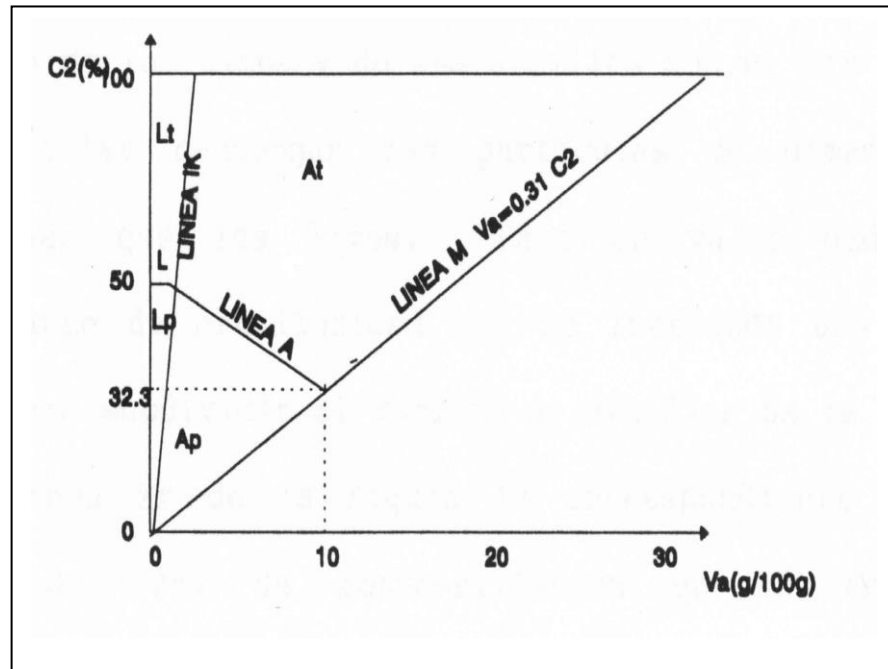
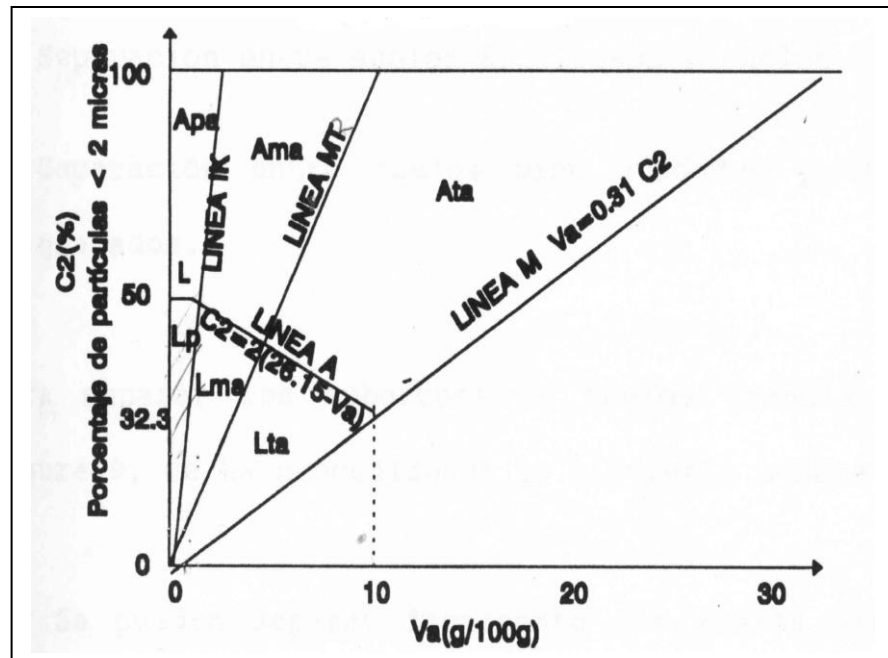


Figura 10. Clasificación propuesta para suelos finos.



Serie 1. Línea M, de ecuación  $V_a = 0.31 C_2$ . Corresponde a las Montmorillonitas puras. Se puede considerar que no hay suelos naturales por debajo de esta línea. Ciertas Montmorillonitas presentan un valor de azul superior, en este caso, se clasificarán colocándolas sobre la línea M considerando sus valores de  $C_2$ . (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

Serie 2. Línea IK, de ecuación  $V_a = 0.023 C_2$ , separa las arcillas y los limos. Esta línea corresponde a las muestras cuyos granos son inferiores a 400 micras ( $C_{400} = 100\%$ ) y cuyas fracciones arcillosas están constituidas por 50% de Caolinita y 50% de Illita. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

Serie 3. La línea L, de ecuación  $C_2 = 50$ , está limitada por la línea IK y sirve para separar los limos poco plásticos de los muy plásticos. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

Serie 4. Línea A, de ecuación  $C_2 = 52.3 - 2V_a$ , separa las arcillas poco plásticas de las arcillas muy plásticas. Esta línea es un segmento que reúne la intersección de líneas IK, L ( $V_a=10$ ,  $C_2=32.3\%$ ) y la línea M. (ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y DESEMPEÑO DE LOS MATERIALES PARA CAMINOS Y LOS PAVIMENTOS 1996).

## **COMENTARIOS SOBRE LOS SISTEMA DE CLASIFICACIÓN**

Los sistemas de clasificación Francés, USCS y AASHTO, se basan en las propiedades de las partículas minerales como tamaño y composición mineralógica. Para inferir la mineralogía los métodos USCS y AASHTO evalúan el comportamiento del material en condición remoldeada (Límites de consistencia), mientras el sistema Francés utiliza la prueba de adsorción (Valor de azul).

La proporción de los diferentes minerales arcillosos, los cationes de intercambio presentes, la cantidad de agua adherida y la superficie específica; son variables que no tienen igual influencia o peso en los valores del índice de plasticidad y el valor de azul de un determinado suelo, debido a esto se presentan casos que para diferentes suelos el resultado de valor de azul sea el mismo pero con diferentes

índices de plasticidad. Lo cual lleva a concluir que el sistema de clasificación francés difiere con respecto al AASHTO y al USCS.

En uno de los estudios de la Investigación Nacional de Pavimentos Fase III, realizada por la Universidad Del Cauca se encontró que al clasificar los suelos por los diferentes sistemas, el mejor método para inferir el comportamiento general de un suelo según el grupo donde quede clasificado, es el sistema AASHTO. Este método se destaca por ser más estricto en definir las fronteras, tanto en los suelos granulares y los limo arcillosos, el sistema considera la frontera del %Pasa N° 200  $\leq 35$  mientras que el USCS considera un %Pasa N° 200  $\leq 50$ , a pesar de que ambos sistemas requieren de conocer los valores del límite líquido y el índice de plasticidad; por lo tanto con estos parámetros esta más acorde con el comportamiento del suelo, al igual maneja más grupos y presenta una mejor descripción de cada uno, como se mencionó refina la clasificación con el IG dentro de un grupo.

La ventaja del sistema francés es clasificar los suelos finos con base en la actividad de los minerales arcillosos presentes en ellos; por tanto este sistema no requiere de los límites de Atterberg usados los métodos de clasificación AASHTO y USCS, sino de la determinación del valor de *azul* a partir de la composición mineralógica de los suelos.

El uso de un sistema de clasificación no elimina la necesidad de estudios detallados de suelos o de ensayos para determinar las propiedades de ingeniería; en resumen se puede decir que ninguno de los sistemas de clasificación puede servir más que como un punto de partida para la adecuada descripción de los suelos.

## 2. METODOLOGÍA

2.1. Se revisaron los estudios realizados sobre el tema por el grupo de investigación Geotecnia y Pavimentos de La Universidad del Cauca, por otras universidades destacándose los estudios realizados en Francia y España donde se tiene la experiencia en la realización de la prueba y en artículos obtenidos en Internet.

2.2. Recolectadas varias muestras se procedió a realizar la caracterización correspondiente para conocer su índice de plasticidad, y así efectuar la selección de cuatro muestras con diferentes Índices de Plasticidad, uno por grupo, de acuerdo con el cuadro 12. Su origen aparece consignado en el cuadro 13.

Cuadro 11. Rangos de plasticidad.

SUELO	Ip	CALIFICATIVO
Gris	0 – 3	No plástico
Blanco	4 – 15	Ligeramente plástico
Habano	15 – 30	Medianamente plástico
Rojizo	> 31	Muy plástico

Cuadro 12. Descripción de los suelos en estudio.

MUESTRA No.	DESCRIPCION	ORIGEN
1	Material de cantera, suelo color rojizo	Talud FIC
2	Material de cantera, suelo color habano	Cantera Vía Julumito.
3	Material de cantera, suelo color blanco	Cantera colorada vía La Plata-Paicol
4	Material de trituración, color gris	Planta Ecocivil

Figura 11. Fotografía de los suelos seleccionados.





2.3. Se realizaron los ensayos, con el fin de evaluar los diferentes índices tradicionales de cada suelo. Las normas utilizadas en este estudio son las anotadas en el cuadro 13.

Cuadro13. Normas utilizadas en el estudio.

ENSAYO	NORMA
LL	I.N.V.E-125
LP	I.N.V.E-126
LC	I.N.V.E-127
Equivalente de arena	I.N.V.E-133
Granulometría por tamizado	I.N.V.E-213
Hidrómetro	I.N.V.E-124
Gravedad específica	I.N.V.E-128
Compactación Harvard miniatura	Manual. Sanchez Sabogal
CBR	I.N.V.E-148
Finura por Blaine de permeabilidad al aire	I.N.V.E-302
Valor de Azul	I.N.V.E-235

2.3.1. Límites de Atterberg. Límite líquido, límite plástico y de contracción, al pasa N°40.

Figura 12. Fotografía del equipo para límites.



2.3.2. Equivalente de arena a la fracción pasa N°40 en estado seco al aire.

Figura 13. Fotografía del equipo de equivalente de arena.



2.3.3. Granulometría combinada. Con procedimientos de tamizado hasta el N° 200 y con el método del hidrómetro al pasa N° 200.

Se calcularon los índices de grupo con base en el límite líquido, límite plástico y el porcentaje pasa 200.

Figura 14. Fotografía equipo de hidrómetro.



Se determinó la cantidad de minerales arcillosos (tamaño  $< 2\mu\text{m}$ ), con base en los resultados de la granulometría combinada.

El ensayo de Hidrómetro requiere para su cálculo los resultados de gravedad específica.

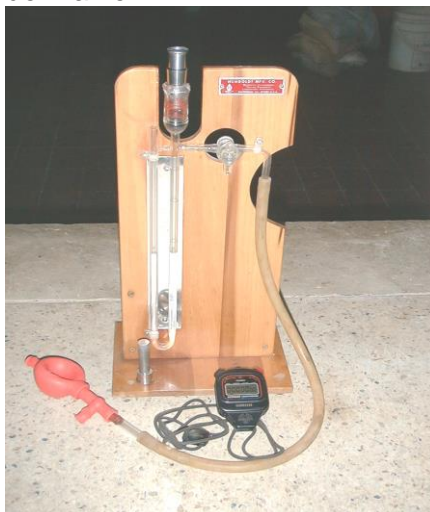
Figura 15. Fotografía del equipo de gravedad específica.



- Aunque no estaba contemplado en la propuesta inicial, se midió la superficie específica a los cuatro suelos en estudio con ayuda del equipo de Blaine y así tener un parámetro adicional para el análisis de los resultados del valor de azul y de los otros índices como medio para evaluar la nocividad de los suelos.

Según la norma inicialmente se realizó con una porosidad de 0.5, pero se tuvo dificultad con dos suelos, por lo anterior se realizaron tanteos hasta obtener una porosidad de trabajo adecuada de 0.63. La norma de Blaine permite variar la porosidad siempre y cuando este valor sea contemplado en los cálculos. Al suelo que permitió el manejo de las dos relaciones de porosidad se le hizo la determinación en ambos arreglos con el fin de tener la certeza que esta variable no iba a afectar los resultados. (Se efectuaron en total cinco pruebas más los tanteos requeridos para llegar a una porosidad de 0.63).

Figura 16. Fotografía del Aparato de Blaine.



2.3.5. Se efectuaron ensayos de Valor de Azul por duplicado para cada una de las variantes propuestas en el anteproyecto los cuales se describen en el cuadro 14, más una variante que se considero importante (fracción pasa 325), con el fin de contar con más elementos para evaluar la prueba.

Cuadro 14. Variaciones de las condiciones en los ensayos de valor de azul.

Ensayos de Valor de Azul de Metileno	Pasa N°40	Seco al horno	Sin inmersión - tiempo norma
			Con inmersión - 24 horas
	Seco al aire	Sin inmersión - tiempo norma	
		Con inmersión - 24 horas	
	Pasa N°200	Seco al horno	Sin inmersión - tiempo norma
			Con inmersión - 24 horas
		Seco al aire	Sin inmersión - tiempo norma
			Con inmersión - 24 horas
Pasa N°325	Seco al horno	Sin inmersión - tiempo norma	

La variante remarcada corresponde a la norma I.N.V.E-235.

Según lo establecido por la norma el tiempo de inmersión es cero, ya que se colocan las cantidades requeridas de suelo (2 g.), azul (0.05 g.) y agua destilada hasta completar 150 cc., y se da inicio a la prueba inmediatamente de acuerdo al procedimiento mencionado en dicha norma.

El proceso de inmersión consistió en colocar las cantidades de suelo (2 g.), azul (0.05 g.) y agua destilada hasta 150 cc., y dejarlos durante 24 horas en esta

condición, terminado este tiempo se inicia la prueba de acuerdo al procedimiento mencionado en dicha norma.

Nota: se obtuvieron de esta forma 36 valores de azul (9 variantes por cuatro suelos) siendo cada valor el resultado del promedio de dos pruebas realizadas en similares condiciones y que cumpliesen con la precisión exigida por la norma. En resumen se efectuaron 72 ensayos de Valor de Azul en esta parte del trabajo.

Figura 17. Fotografía del equipo de azul de metileno.



Al momento de trabajar el suelo gris, se suscitaron problemas al evaluar la solución sobrenadante, no se pudo determinar cuando esta tenía una apariencia cristalina, ya que en el desarrollo de la prueba se presentaba la disminución de color pero se llegaba a un punto en el cual se tornaba turbio y a medida que se agregaba más suelo la turbiedad era mayor. Como se muestra en la figura 18.

Figura 18. Fotografía de los tubos resultantes del ensayo de azul de metileno. Suelo gris.



Por lo anterior se decidió reducir la cantidad de azul de metileno (de 0.05 a 0.02 g.), e iniciar con 2 g. de suelo; con el fin de disminuir la cantidad de suelo requerida para obtener el resultado del Valor de Azul y evitar la propensión a la turbiedad del líquido sobrenadante, esta decisión hace que el ensayo requiera menos ciclos adicionando suelo, por lo tanto se optimizó el tiempo para realizar la prueba.

Con relación a la cantidad de 0.02 g. de azul de metileno, es importante aclarar que se eligió esta cantidad teniendo en cuenta la sensibilidad de la balanza requerida para este ensayo y procurando que la realización de la prueba se efectuara con el mismo criterio para terminar la prueba utilizado en el resto de los suelos. Además permitía tener un resultado certero, dado que se obtuvo un estado cristalino en un tanteo antes de tornarse la solución turbia.

Con el fin de evaluar el efecto de la cantidad de azul se efectuaron las pruebas de Valor de Azul en otros tres suelos utilizando una cantidad de 0.02 g. (8 pruebas más de valor de azul).

2.3.6. Aunque no estaba contemplado en la propuesta inicial, se decidió observar con mejor claridad el efecto de la humedad inicial en el Valor de Azul analizando por lo menos un suelo (el suelo rojizo) con cinco incrementos de humedad. Se escogió este suelo por ser el más plástico y por ser el suelo que requería menos tiempo en la realización de la prueba.

Nota: Todos los ensayos de azul de metileno se realizaron por duplicado para evaluar la repetitividad del procedimiento seguido. En resumen se efectuaron 10 pruebas de Valor de Azul adicionales.

- Para evaluar la efectividad de los diferentes índices manejados en este estudio como medios para inferir el comportamiento del suelo, se realizó una medición de la sensibilidad al agua.

Figura 19. Fotografía del equipo Harvard Miniatura.



La sensibilidad al agua se evaluó, midiendo la resistencia conservada la cual se define como la relación entre la resistencia con inmersión y la resistencia sin inmersión, y el porcentaje de expansión libre, medido este a través de la expansión libre hasta lograr que se establezca el hinchamiento del suelo, el cual se consigue entre 24 y 45 horas dependiendo del tipo de suelo.

A la fracción pasa N° 40 de los cuatro suelos de estudio se les evaluó la sensibilidad al agua, para lo cual se efectuó inicialmente las curvas de compactación con la energía del Harvard Miniatura intermedia (5 capas, 25 apisonadas por capa y una carga máxima al pisón de 20 lb.), con las cuales se obtuvieron los valores de densidad máxima y humedad óptima para cada suelo. Con el valor obtenido de humedad óptima se elaboraron dos briquetas por suelo y con la misma energía aplicada anteriormente, las cuales se penetraron por una cara con el penetrometro de bolsillo y así obtener la resistencia sin inmersión. Se llevaron las briquetas a inmersión, con el conjunto molde, base y collar, realizando el respectivo montaje para determinar las lecturas de expansión libre hasta lograr la estabilización en estas. Terminado el tiempo de inmersión se penetraron por la otra cara con el penetrometro de bolsillo y así obtener la resistencia con inmersión. En la medición de la expansión libre se busco realizar el procedimiento de medición usado en el ensayo de CBR, pero sin el uso de sobrecargas..

Figura 20. Fotografía del montaje para susceptibilidad al agua.



El suelo blanco presentó problemas al momento de la penetración después de inmersión (resistencia igual a cero), por lo que se decidió realizar el ensayo de CBR a ese suelo en particular, aplicando una energía intermedia, tratando de obtener una humedad y densidad similares a las obtenidas con el Harvard

Miniatura; el cual se penetra antes y después de inmersión, y se determinó la expansión para despejar dudas sobre el comportamiento frente a cambios de humedad de este suelo.



### 3. RESULTADOS

En los cuadros 15 y 16 se consignan los valores de los índices determinados en el estudio para los cuatro suelos considerados en este trabajo, se destaca una columna en la que se registran los valores de azul de metileno efectuado acorde con la norma I.N.V. E-235.

Los resultados que se anotan en los cuadros son el promedio del número de pruebas que exigen las normas de ensayo, promedios que se realizan siempre y cuando se cumpla con las tolerancias de dispersión exigidas por las mismas.

En los cuadros. 17 y 18 se presentan los resultados de la prueba de superficie específica (Método de Blaine). Se debe anotar que por la diversidad en la finura de los cuatro suelos, no se pudo manejar la misma porosidad para todas las muestras, pero se tuvo el cuidado al efectuar los cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula de superficie específica:

$$S = \frac{S_p G_p (1 - e_p) \sqrt{e_3} \sqrt{T}}{G (1 - e) \sqrt{e_3 p} \sqrt{T_p}}$$

Donde:

S = Superficie específica de la muestra en ensayo, en cm<sup>2</sup>/g.

S<sub>p</sub> = Superficie específica de la muestra patrón, cm<sup>2</sup>/g.

T = Tiempo determinado para la muestra en ensayo, en s.

T<sub>p</sub> = Tiempo determinado para la muestra patrón, en s.

e = Porosidad de la capa de muestra en ensayo.

e<sub>p</sub> = Porosidad de la capa de muestra patrón.

G = Peso específico de la muestra en ensayo.

G<sub>p</sub> = Peso específico de la muestra patrón (adóptese 3.15).

Esta expresión nos permite trabajar con porosidades diferentes a la propuesta por la norma, (e = 0.5), cuando se trabaja con materiales diferentes al cemento Pórtland tipo I.

Para la selección de la relación de vacíos en los suelos en los que resulto imposible realizarlos con 0.5, se busco por tanteos la que fuese más cercana a estas y que se ajustara a las condiciones de finura de los suelos, la porosidad utilizada fue 0.63, es la mínima para encontrar el peso de muestra necesario para su colocación en la cámara de permeabilidad.

Los resultados obtenidos cumplen con la tolerancia de la norma de ensayo (I.N.V. E-302) en donde no deben diferir en mas del 2% entre si.

Cuadro 15. Resultados del valor de azul con las variantes contempladas.

VALOR DE AZUL CON LAS VARIANTES CONTEMPLADAS												
SUELO	Ensayo Nº	V.A PASA Nº 40					V.A PASA Nº 200					V. A. PASA Nº325
		% w	seco al aire sin inmersión	seco al aire con inmersión	seco al horno sin inmersión	seco al horno con inmersión	% w	seco al aire sin inmersión	seco al aire con inmersión	seco al horno sin inmersión	seco al horno con inmersión	seco al horno sin inmersión
ROJIZO	1	24,1	1,29	1,55	<b>1,43</b>	1,25	20,6	1,51	1,28	1,43	1,43	2,50
	2		1,24	1,55	<b>1,35</b>	1,25		1,44	1,28	1,35	1,35	2,38
HABANO	1	3,7	1,48	1,73	<b>1,25</b>	1,43	3,5	1,40	1,30	1,38	1,56	2,38
	2		1,48	1,73	<b>1,11</b>	1,35		1,40	1,30	1,22	1,39	2,38
BLANCO	1	1,6	0,63	0,73	<b>0,67</b>	0,74	1,4	0,72	0,70	0,64	0,73	0,75
	2		0,60	0,71	<b>0,63</b>	0,71		0,63	0,73	0,66	0,73	0,73
GRIS	1	1,4	0,63	0,22	<b>0,30</b>	0,27	2,2	0,61	0,63	0,46	0,57	0,80
	2		0,56	0,22	<b>0,30</b>	0,27		0,61	0,63	0,46	0,57	0,91

Cuadro 16. Resultados de los índices evaluados en el estudio.

INDICES EVALUADOS EN EL ESTUDIO																		
SUELO	IG	LL	LP	Ip	LC	%P200	%<2 μ	E. A	V.A PASA Nº 40				V.A PASA Nº 200				V.A PASA Nº325	
									seco al aire	seco al aire	seco al horno	seco al horno	seco al aire	seco al aire	seco al horno	seco al horno	seco al horno	
									sin inmersión	con inmersión	sin inmersión	con inmersión	sin inmersión	con inmersión	sin inmersión	con inmersión	sin inmersión	
ROJIZO	20	75,5	42,8	32,7	27,4	76,6	21	7	1,27	1,55	1,39	1,25	1,48	1,28	1,39	1,39	2,44	
HABANO	14	60,0	32,7	27,3	29,5	58,1	5,5	10	1,48	1,73	1,18	1,39	1,40	1,30	1,30	1,48	2,38	
BLANCO	8	32,5	23,9	8,6	23,0	90,2	7,2	5	0,62	0,72	0,65	0,73	0,68	0,72	0,65	0,73	0,74	
GRIS	0	Np	Np	Np	Np	8,2	0,7	72	0,60	0,22	0,30	0,27	0,61	0,63	0,46	0,57	0,86	

Cuadro 17. Resultados de superficie específica,  $e = 0.5$ .

NORMA I.N.V.E-302		
SUELO	FRACCION	SUPERFICIE ESPECÍFICA ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
<b>Gris</b>	Pasa N° 40	690
	Pasa N° 200	2081
	Pasa N° 325	4309
<b>Blanco</b>	Pasa N° 40	3211
	Pasa N° 200	3635
	Pasa N° 325	3855
Sp = 4500 $\text{cm}^2/\text{g}$ . - Tp = 96.62 s. - ep = e = 0.5		

Cuadro 18. Resultados de superficie específica,  $e = 0.63$ .

NORMA I.N.V.E-302		
SUELO	FRACCION	SUPERFICIE ESPECÍFICA ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
<b>Blanco</b>	Pasa N° 40	3218
	Pasa N° 200	3443
	Pasa N° 325	3838
<b>Habano</b>	Pasa N° 40	5064
	Pasa N° 200	6769
	Pasa N° 325	9558
<b>Rojizo</b>	Pasa N° 40	2996
	Pasa N° 200	5651
	Pasa N° 325	7349
Sp = 4500 $\text{cm}^2/\text{g}$ . - Tp = 96.62 s. - ep = 0.5 - e = 0.63		

Las granulometrías de la fracción menor de 74 $\mu\text{m}$  de los cuatro suelos analizados, determinados mediante la prueba del hidrómetro se presentan en la figura 21 y las granulometrías de todo el conjunto del suelo, determinadas por métodos combinados del hidrómetro y del tamizado se presenta en la figura 22.

Figura 21. Granulometría por hidrómetro de los suelos analizados.

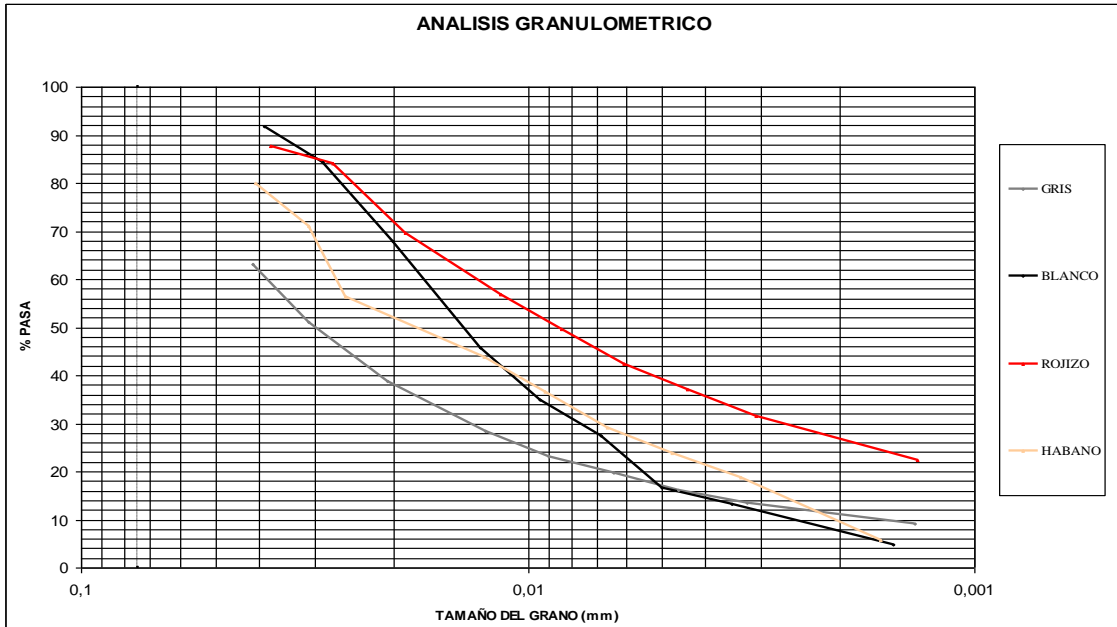
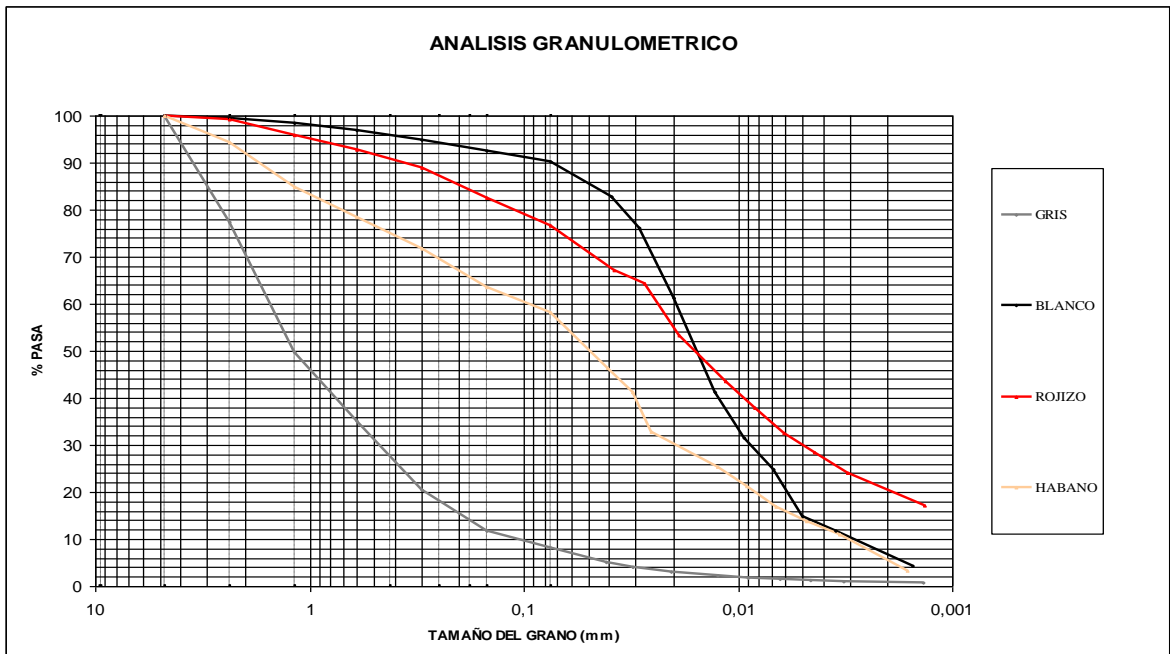


Figura 22. Granulometría total de los suelos analizados.



En los suelos poco y no plásticos se observó que realizar la prueba de acuerdo a la norma de INVIAS E-235 es difícil y demorada porque el agua sobrenadante después de realizar varios ciclos adicionando suelo, no se torna cristalina aunque

pierde la coloración azul presenta turbiedad a medida que se agrega suelo, situación que dificulta encontrar el momento en el que se debe dar por terminada la prueba. Buscando hacer más eficiente y precisa la prueba de azul en estos suelos se encontró procedente investigar el desarrollo del ensayo disminuyendo la cantidad de azul de metileno exigida por la norma I.N.V. E-235 de 0.05g a 0.02g. Los resultados son los que se registran en el cuadro 19. Se observa una tendencia hacia valores mayores de azul cuando se utiliza 0.02 g. de azul en todos los suelos, lo que no impediría realizar con 0.02 en suelos poco y no plásticos ya que se haría un control más estricto de calidad dado que la especificación exige un Valor de Azul máximo. Además los valores obtenidos con 0.02 y 0.05 g. de azul están dentro de la precisión exigida en todos los suelos.

Cuadro 19. Valor de azul para ensayos con 0.02 y 0.05 g. de azul de Metileno de acuerdo a norma INVIAS.

<b>EFFECTO DE LA DISMINUCION DE LA CANTIDAD DE AZUL CON EL VALOR DE AZUL DE METILENO</b>		
<b>SUELO</b>	<b>VA<sub>P(0,02AM)</sub></b>	<b>VA<sub>P(0,05AM)</sub></b>
Rojizo	2,0	1,30
Habano	1,82	1,39
Blanco	0,83	0,70
Gris	0,44	

La norma de ensayo (I.N.V. E-235) maneja muestras secas al horno, pero teniendo en cuenta que el proceso de adsorción del azul de metileno tiene que ver con la capacidad de intercambio catiónico neta del suelo, es decir lo que queda libre después de descontar la capacidad copada por el agua adsorbida, y que parte de esta agua se puede perder en el proceso de secado a temperaturas mayores de 60°C. Se encontró conveniente trabajar la prueba al menos con un suelo y con cinco humedades.

Es importante aclarar que en las muestras en las cuales se incrementó el contenido de agua respecto a la condición inicial, se dejaron durante una noche para permitir el proceso de adsorción de agua por parte de los minerales arcillosos presentes en el suelo rojizo, que fue el que se utilizó en esta evaluación. Los resultados se presentan en el cuadro 20.

Cuadro 20. Resultados del valor de azul de metileno del suelo rojizo variando el contenido de humedad.

Muestra No.	Azul Metileno (g).	V.A.	Humedad %
1	0,02	1,08	34,1
2	0,02	1,02	38,7
3	0,02	0,63	41,8
4	0,02	0,81	50,1
5	0,02	1,14	54,5

Para evaluar la efectividad de los diferentes índices considerados en este estudio e inferir la nocividad de los finos, se midió la sensibilidad al agua de los cuatro suelos utilizando briquetas compactadas con la humedad óptima de compactación del Harvard Miniatura con una energía correspondiente a: 5 capas, 25 apisonadas por capa y una carga máxima del pisón de 20lb. La evaluación abarca tres mediciones, la resistencia a la penetración sin inmersión, la resistencia a la penetración con inmersión y la medición de la expansión libre a un tiempo suficiente para que se establezca el hinchamiento del suelo, entre 24 y 45 horas. Los resultados se presentan en el cuadro 21.

Cuadro 21. Análisis de la sensibilidad al agua.

SUELO	%W COMPACTACION	$\gamma_d$ Ton/m <sup>3</sup>	RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN Kg/cm <sup>2</sup>		% EXPANSION
			SIN INMERSION	CON INMERSION	
<b>Rojizo</b>	42,3	1,240	2.1	1,5	0,08
	42,3	1,231	2.0	1,25	0,08
<b>Habano</b>	37,9	1,278	4.5	1,2	0,18
	37,9	1,250	4.1	1,4	0,29
<b>Blanco</b>	23,9	1,464	>4.5	0	2,33
	23,9	1,435	>4.5	0	1,37
<b>Gris</b>	5,4	1,797	>4.5	3,5	0,0
	5,4	1,768	>4.5	3,0	0,07
<b>Blanco con prueba de CBR</b>	23,5	1,496	9,3	2,6	3,2
	23,7	1,529	14,1	4,7	3,6

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

### 4.1. SOBRE LOS RESULTADOS RELACIONADOS CON EL PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE AZUL DE METILENO.

#### 4.1.1. Incidencia de la fracción analizada en el valor de azul de metileno.

Cuadro 22. Relación entre el valor de azul y fracciones pasa N° 200, pasa N° 40.

SUELO	% PASA No.40	% PASA No.200	VALOR DE AZUL SECO AL HORNO SIN INMERSION	
			PASA No. 40	PASA No.200
<b>Rojizo</b>	91.0	76.6	1.39	1.39
<b>Habano</b>	75.5	58.1	1.18	1.30
<b>Blanco</b>	96.0	90.2	0.65	0.65
<b>Gris</b>	28.0	8.2	0.30	0.46

Como se observa en el cuadro 22 en los suelos rojizo y blanco, en los que el pasa N°200 es un porcentaje significativo del suelo, los valores de azul no están afectados por la fracción ensayada. Si se toma el cambio de fracción como repetición del ensayo con muestras diferentes se nota una excelente exactitud en la prueba.

Es interesante analizar los suelos habano y gris, en ellos hay diferencia importante entre el pasa N°40 y el pasa N°200, como es de esperar cuando se hace a la fracción pasa No.200, aumenta la concentración de minerales arcillosos (<2 $\mu$ m), y el Valor de Azul da mas alto. Es importante resaltar que para cada uno de estos suelos se hicieron cuatro pruebas por fracción y todos cumplen prácticamente con la precisión que exige la norma estudiada (0.2 de tolerancia entre resultados). Como se indica en el cuadro 23.

Cuadro 23. Relación del valor de azul y fracciones pasa N° 40, pasa N° 200.

SUELO	VALOR DE AZUL SECO AL HORNO SIN INMERSION			
	PASA No. 40		PASA No. 200	
<b>Habano</b>	1.25	1.11	1.38	1.22
<b>Gris</b>	0.30	0.30	0.46	0.46

La precisión que maneja la norma es cuestionable, en primer término porque a pesar de modificar las condiciones de la muestra en lo que a fracción a ensayar



se refiere, en los suelos que el pasa N° 40 difiere del pasa N° 200, los valores de azul aunque reflejan el cambio realizado siguen prácticamente cumpliendo con la precisión exigida del 0,2; en segundo término porque se maneja independiente del orden de los valores de azul alcanzados, siendo significativo únicamente para valores de azul bajos, menores del 1.0%.

En suelos con pocos minerales arcillosos, 0.2 es una diferencia significativa y además implica varios ciclos en la realización de la prueba, adicionando suelo, cuando se busca que el líquido sobre-nadante sea incoloro. Por lo tanto en estos suelos se debía manejar una precisión más baja acorde a los bajos valores de azul que se encontraron y a la dificultad para realizar la prueba (muchos ciclos).

Si no se manejara la precisión de 0.2 de Valor de Azul de la norma, en suelos arenosos con finos poco plásticos sería conveniente realizarlo a la fracción <74 $\mu$ m para aumentar un poco el resultado del Valor de Azul y acelerar la ejecución de la prueba.

4.1.2. Incidencia del tiempo de inmersión del suelo en solución de azul de metileno.

Como se observa en el cuadro 15 “Resultados del Valor de Azul con las variantes contempladas”, el tiempo de inmersión que se realizó (24 horas) con el propósito de favorecer la adsorción de los cationes de Azul de Metileno el cual no es considerado en la norma, aumento los valores de azul, tendencia que no es contundente en los dos suelos extremos, el rojizo muy plástico y en el gris no plástico.

Claro está que en ningún caso se originaron incrementos en el Valor de Azul superiores a 0.2 que es la precisión manejada en la norma.

4.1.3. Incidencia de la humedad inicial de la muestra en el Valor de Azul.

En los resultados presentados en el cuadro 24, se encuentra que cuando se analiza la fracción de suelo <74 $\mu$ m y se hace sin inmersión, el iniciar el ensayo con una muestra seca al aire arroja en todos los suelos resultados mayores del Valor de Azul que los obtenidos con la muestra seca al horno. También se destaca el comportamiento del suelo gris en el que la circunstancia de comenzar el ensayo con una muestra seca al aire, utilizando la fracción pasa No.40 dio valores significativamente mayores de Valor de Azul.

Cuadro 24. Ensayos del valor de azul a la fracción < 74 µm sin inmersión.

SUELO	FRACCION	SECO AL AIRE		SECO AL HORNO
		%W	V.A.	V.A.
<b>Rojizo</b>	PASA No.200	20.6	1.48	1.39
<b>Habano</b>	PASA No.200	3.5	1.40	1.30
<b>Blanco</b>	PASA No.200	1.4	0.68	0.65
<b>Gris</b>	PASA No.200	2.2	0.61	0.46
<b>Gris</b>	PASA No.40	1.4	0.60	0.30

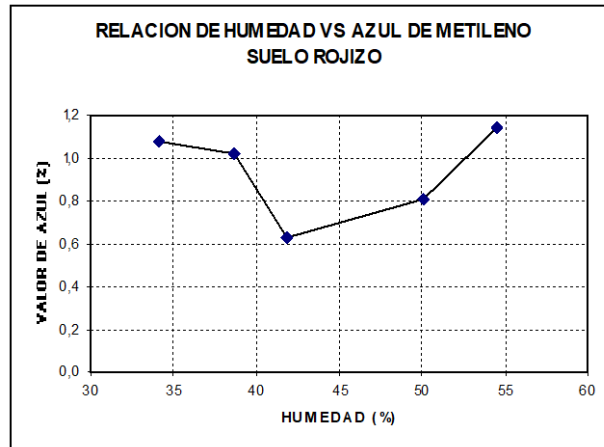
(Los valores registrados en el cuadro 24 son el promedio de dos pruebas, siempre y cuando cumplan con la precisión).

Este comportamiento de los resultados, permite considerar una recomendación para contemplar en la norma del Valor de Azul. Realizar la prueba con muestra seca al aire dado que en la mayoría de los casos proporciona un Valor de Azul más alto, situación que ahorraría un paso en la realización de la prueba y los resultados favorecerían las actividades de control de calidad en lo que a nocividad de finos respecta. Pero las especificaciones manejan límites superiores del Valor de Azul, por ejemplo el Valor de azul debe ser <1,0 %.

Al suelo rojizo se le realizó la prueba del valor de azul de acuerdo a la norma, con la excepción de la humedad de la muestra, que se varió adicionando cinco incrementos de humedad, sus resultados aparecen consignados en el cuadro 20.

En la figura 23 se observa que la presencia de humedad en la muestra origina una gran dispersión en los resultados, la tendencia inicial es la disminución del Valor de Azul a medida que se aumenta la humedad hasta que esta alcance el límite plástico y posteriormente comienza a aumentar el Valor de Azul a medida que aumenta el contenido de agua. Cuando las humedades de las muestras son menores que el límite plástico, las fuerzas de atracción entre partículas son considerables, formándose agregados de arcilla en los que se reduce la superficie específica y por lo tanto decrece la capacidad de intercambio catiónico. Pero si las humedades son mayores que el límite plástico, el agua presente es tan alta que se origina una separación entre partículas situación que vuelve a favorecer la adsorción porque se recupera gradualmente la superficie específica real y por tanto se alcanzan valores mayores de azul a medida que se incrementa la humedad.

Figura 23. Incrementos de humedad vs. Valor de Azul.



Los resultados anteriores conllevan a entender la razón de que las muestras deben estar secas al aire o como requiere la norma, secas al horno y no con agua.

#### 4.1.4. Incidencia de la cantidad inicial de azul de metileno en la prueba.

En el suelo gris (N.P.) fue prácticamente imposible realizar la prueba con 0.05 g. de azul de metileno, dado que esta cantidad de azul no puede ser adsorbida por un suelo que no cuenta con minerales activos, por lo que aunque se hagan muchos ciclos, adicionando suelo, el liquido no llega a la condición cristalina, primero se torna turbio. En los suelos poco plásticos y N.P. se decidió iniciar con la menor cantidad posible de azul para converger rápida y eficientemente al final de la prueba. Realizar los ensayos con cantidades menores (0.02 g.), según los resultados de esta investigación dan valores de azul mas altos lo que hace mas exigente el control de calidad de las arenas y llenantes que van a ser utilizadas en pavimentos. Como se indica en el cuadro 19.

#### 4.2. CON RELACION A LOS INDICES.

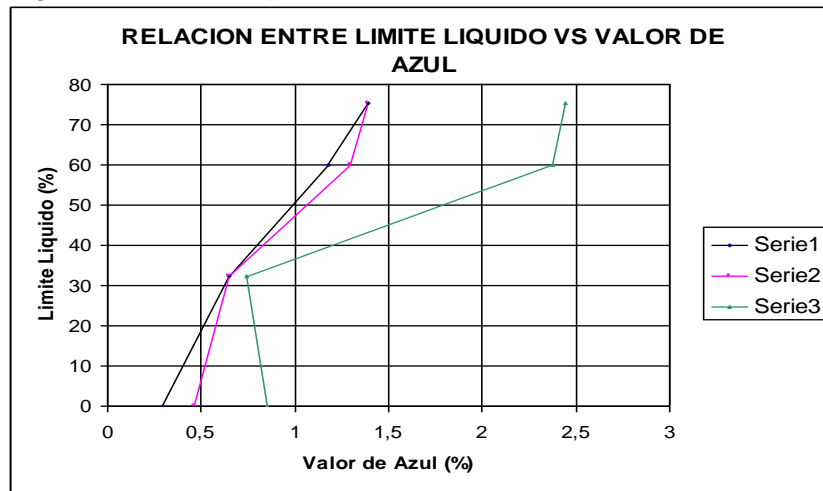
El Limite Liquido es un índice de la superficie específica del suelo, al igual que el Valor de Azul, por esta razón se analiza la relación entre estos dos índices. Como se indica en el cuadro 25.

Cuadro 25. Resultados del valor de azul en diferentes fracciones vs. Valores del límite líquido.

SUELO	LL	VALOR DE AZUL EN DIFERENTES FRACCIONES		
		SERIE 1	SERIE 2	SERIE 3
		PASA N°40	PASA N°200	PASA N°325
<b>ROJIZO</b>	75,5	1,39	1,39	2,44
<b>HABANO</b>	60	1,18	1,30	2,38
<b>BLANCO</b>	32,5	0,65	0,65	0,74
<b>GRIS</b>	0	0,30	0,46	0,85

Nota: Valor de Azul determinado con suelo seco al horno sin inmersión.

Figura 24. Limite líquido vs. Valor de azul.



Los resultados consignados en el cuadro 25 muestran en primer término que el límite líquido no se puede determinar en los suelos no plásticos, mientras el Valor de Azul si se puede hallar. Cuando el Valor de Azul se le determina al suelo que pasa al No.40, idéntica fracción se utiliza para los límites, se tiene una relación lineal entre el limite liquido y el Valor de Azul (serie 1), comportamiento que confirma que ambos índices están afectados en el mismo grado por una de tantas características del suelo, como es la superficie específica. Como se muestra en la figura 24.

La relación lineal entre el Valor de azul y el límite líquido, ha sido encontrada por otros investigadores. Lautrin D. (1989) encontró las siguientes relaciones para suelos de Venezuela:

$$V.A. = 0.20 * L.L.$$

$$V.A. = 0.15 * L.L.$$

$$V.A. = 0.08 * L.L.$$

“Con información previa de la región geológica del material en estudio se puede conocer el límite líquido equivalente a través del Valor de Azul, en el caso de materiales en que su consistencia no pueda ser detectable por el método de la Copa Casagrande” (Sanchez Keak, aplicaciones de RANCOES en el diseño y control de compactación 2004).

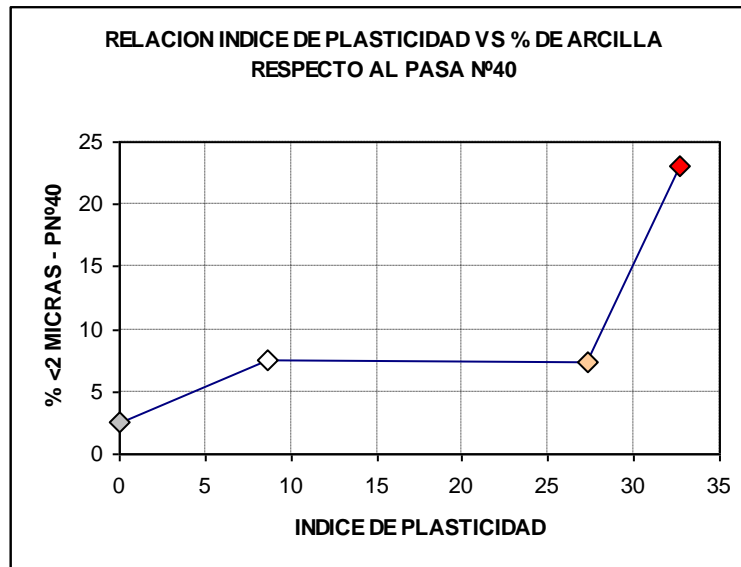
#### 4.3. INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ARCILLA EN EL VALOR DE LOS INDICES.

En el cuadro 26 y en la figura 25, se observa cierta tendencia entre el % < 2 µm de la fracción de suelo pasa No 40 y del IP, pero se puede confirmar que el IP está afectado por otras variables como son el tipo de minerales arcillosos, los cationes de intercambio presentes y el espesor del agua adsorbida.

Cuadro 26. Relación entre el % < 2 µm de la fracción pasa N°40 vs. El índice de plasticidad.

<b>SUELO</b>	<b>% &lt;2 µm</b>	<b>IP</b>
Rojizo	23.1	32,7
Habano	7.3	27,3
Blanco	7.5	8,6
Gris	2.5	0

Figura 25. %<2 μm de la fracción pasa N°40 vs. Índice de plasticidad.

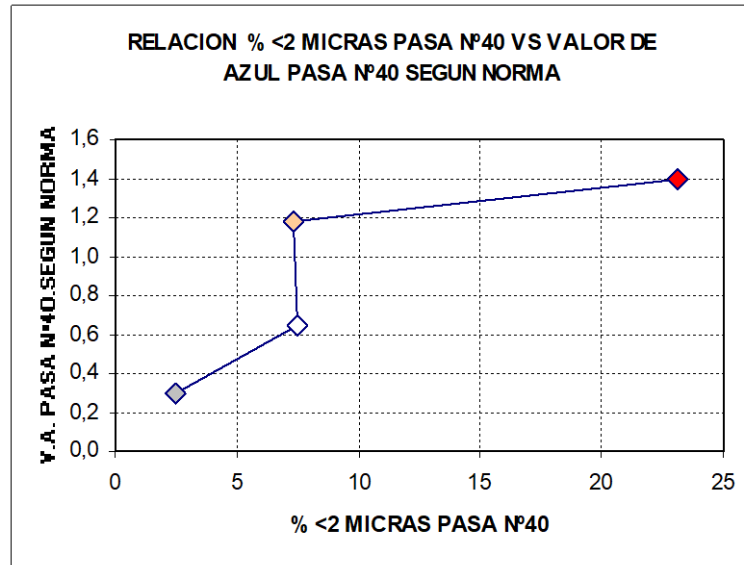


En el cuadro 27 y en la figura 26 se observa que no se tiene una relación lineal entre el Valor de Azul determinado a la fracción pasa N°40 (<400 μm) y el porcentaje de arcilla (<2μm) de la misma fracción.

Cuadro 27. Relación entre la cantidad de arcilla pasa N°40 vs. El Valor de Azul.

SUELO	% <2 μm	V.A.
Rojizo	23.1	1,39
Habano	7.3	1,18
Blanco	7.5	0,65
Gris	2.5	0,3

Figura 26. %<2  $\mu\text{m}$  de la fracción pasa N°40 vs. Valor de Azul.

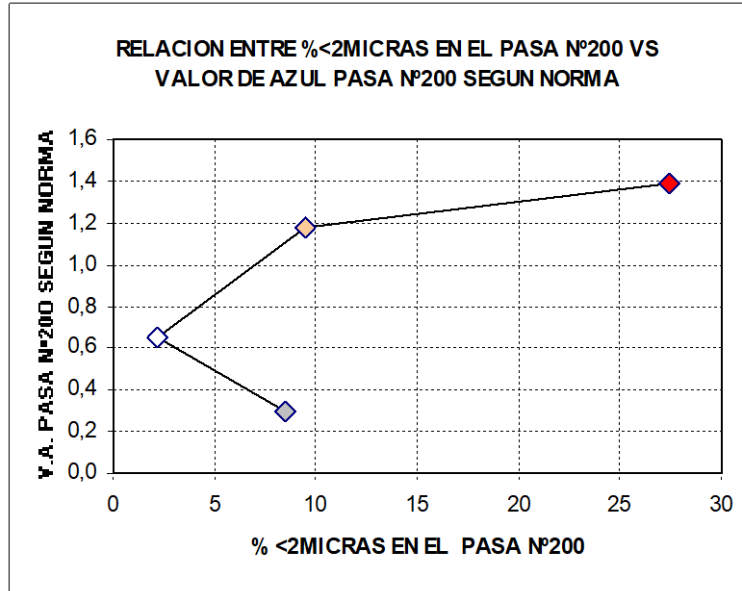


Al observar los valores de azul de la fracción pasa No.200 y el porcentaje de arcilla en esta fracción, cuadro 28 y figura 27, no se encuentra una relación clara, parece que al concentrar la cantidad de arcilla pintan otras variables de los minerales <2 $\mu\text{m}$ . También el suelo blanco es el que presenta un comportamiento extraño que se manifestó en el trabajo de laboratorio y en el análisis de los resultados. No hay una relación lineal pero se aprecia la misma tendencia, al disminuir el Valor de Azul a medida que decrece el porcentaje menor de 2 micras.

Cuadro 28. Relación entre la cantidad de arcilla pasa No.200 vs. El Valor de Azul pasa N°200 según norma.

SUELO	% <2 $\mu\text{m}$	VA
Rojizo	27.4	1,39
Habano	9.5	1,18
Blanco	2.2	0,65
Gris	8.5	0,3

Figura 27. Cantidad de arcilla pasa N° 200 vs. Valor de Azul.



Como se observa en el cuadro 29 y en la figura 28 no existe una relación entre % <math>< 2\mu\text{m}</math> de todos los suelos y el equivalente de arena, se destacan los suelos habano y blanco, dado que estos suelos tienen relativamente pocos minerales arcillosos y sin embargo los valores de E. A. son relativamente bajos. El suelo blanco tiene muy poca arcilla y el equivalente de arena es muy bajo.

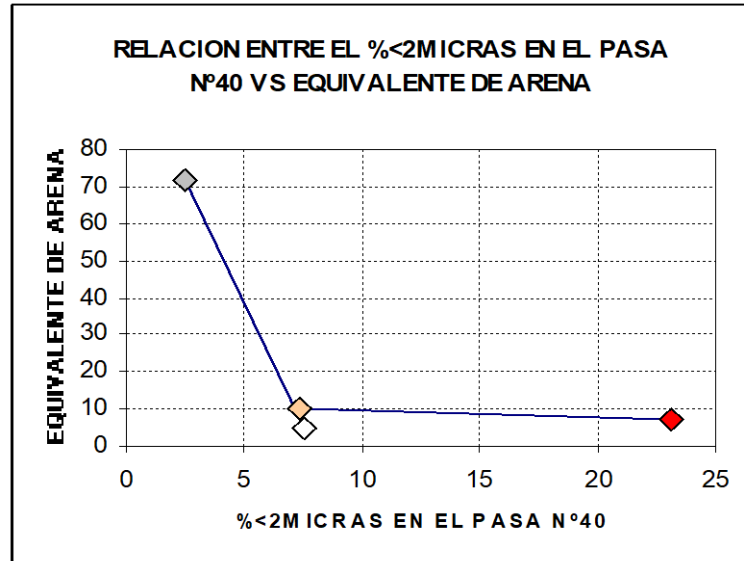
Pero si observamos el cuadro 30, se encuentra que los resultados de equivalente de arena están bien relacionados con el % <math>< 74\mu\text{m}</math>, lo que indica que este índice está más influenciado por la cantidad de finos que por el tipo, ósea por la presencia de minerales arcillosos.

Cuadro 29. Relación % <math>< 2\mu\text{m}</math> en el pasa N°40 vs. Equivalente de arena.

SUELO	% <math>< 2\mu\text{m}</math>	E.A.
<b>Rojizo</b>	23.1	7
<b>Habano</b>	7.3	10
<b>Blanco</b>	7.5	5
<b>Gris</b>	2.5	72



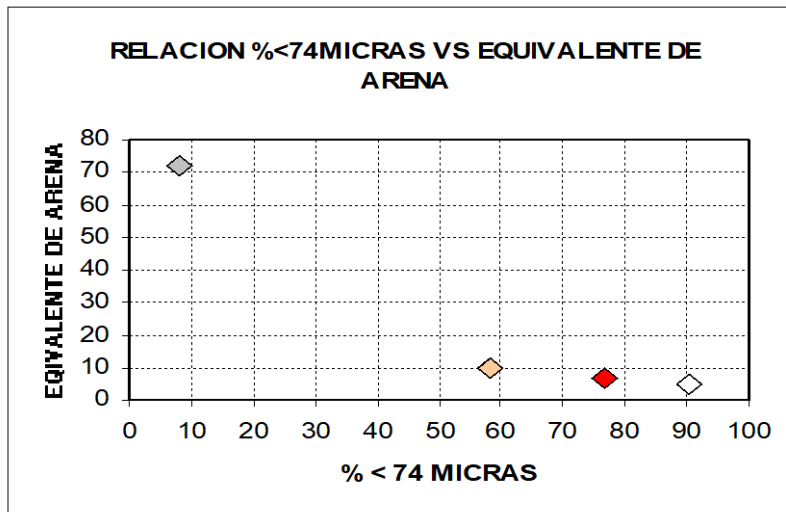
Figura 28. % < 2 μm en el pasa N°40 vs. Equivalente de arena.



Cuadro 30. Relación %<74μm en el pasa N°200 vs. Equivalente de arena.

SUELO	%<74μm	E.A.
Rojizo	76.6	7
Habano	58.1	10
Blanco	90.2	5
Gris	8.2	72

Figura 29. %<74μm vs. Equivalente de arena.

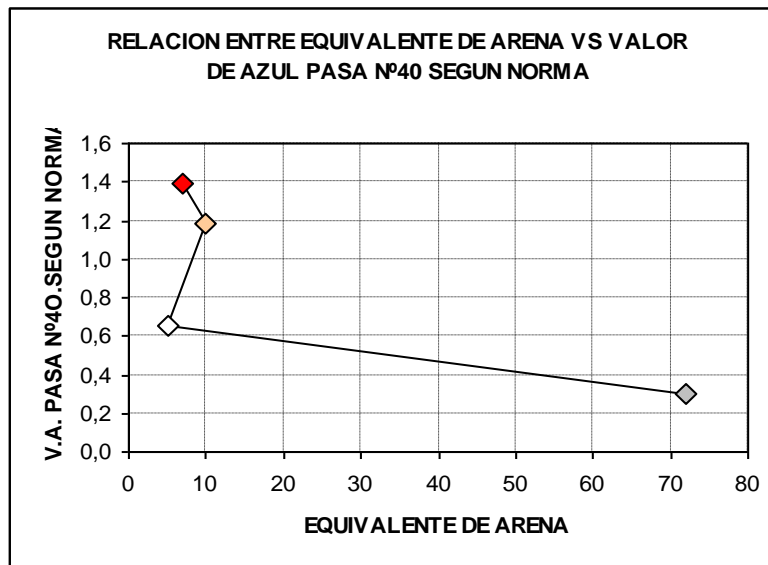


El equivalente de arena no tiene una relación lineal con el Valor de Azul, como se puede observar en los cuadros 31 y 32 y en las figuras 30 y 31. Se confirma que el equivalente de arena está afectado más por la cantidad de partículas finas ( $\% < 74 \mu\text{m}$ ) que por la cantidad de arcilla ( $< 2 \mu\text{m}$ ).

Cuadro 31. Relación Valor de Azul pasa N°40 vs. Equivalente de arena.

SUELO	EA	VA PASA No.40
Rojizo	7	1,39
Habano	10	1,18
Blanco	5	0,65
Gris	72	0,30

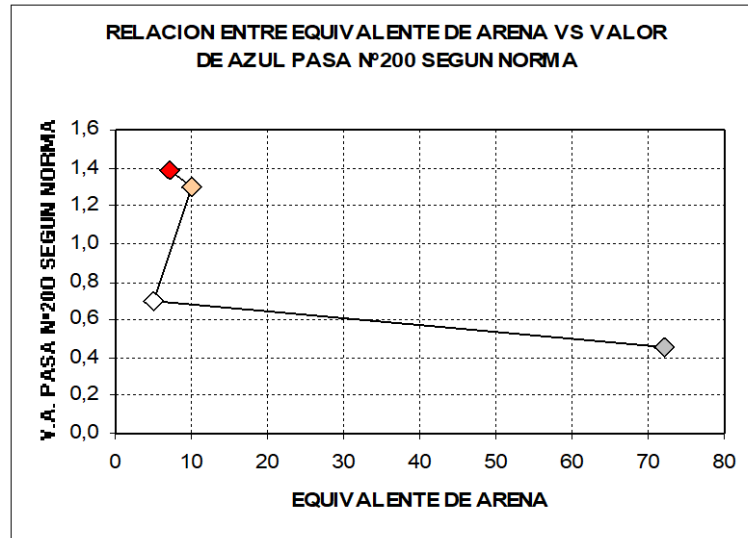
Figura 30. Valor de azul vs. Equivalente de arena.



Cuadro 32. Relación equivalente de arena vs. Valor de Azul pasa N° 40.

SUELO	E.A.	VA PASA No.40
Rojizo	7	1,39
Habano	10	1,3
Blanco	5	0,65
Gris	72	0,46

Figura 31. Equivalente de arena vs. Valor de azul pasa No. 200

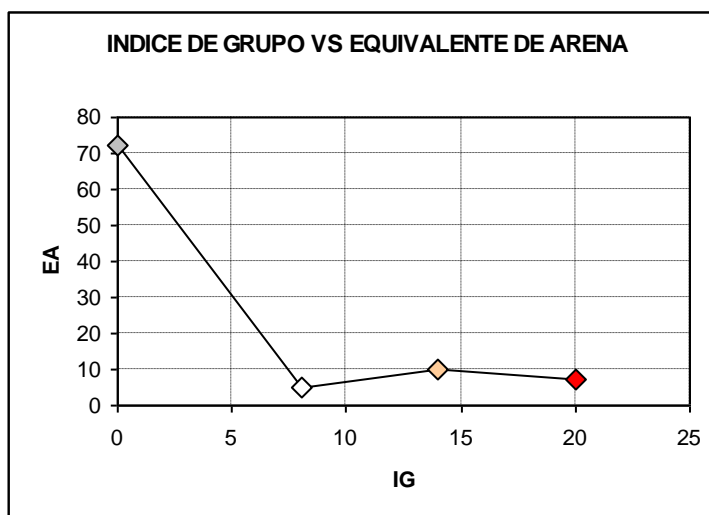


El equivalente de arena tiene el mismo objetivo del índice de grupo AASHTO, por lo tanto en el cuadro 33 y en la figura 32 se observa la relación entre estos dos índices. Se presenta la relación, a menor índice de grupo mayor equivalente de arena con excepción del suelo blanco al que sistemáticamente se le observa un comportamiento también imprevisible.

Cuadro 33. Relación equivalente de arena vs. Índice de grupo.

SUELO	I.G.	E.A.
Rojizo	20	7
Habano	14	10
Blanco	8	5
Gris	0	72

Figura 32. Relación índice de grupo vs. Equivalente de Arena.



En los cuadros 34, 35 y 36, se observa la relación entre superficie específica medida mediante la prueba de Blaine y el Valor de Azul, presenta una relación aceptable entre la superficie específica medida al pasa No. 200 y el valor de azul, pero la relación se confunde cuando se trata de suelos con una grandes superficies específicas, aunque aumente la superficie específica por Blaine, no se da un incremento apreciable del valor de azul. La superficie específica por Blaine guarda, la misma relación con el valor de azul, situación que conserva la linealidad entre el valor de azul y el límite líquido.

Cuadro 34. Relación de superficie específica con el Valor de Azul.

SUELO	BALIEN Cm <sup>2</sup> /g PASA No. 40	V.A. PASA N° 40 SEGÚN NORMA
<b>Rojizo</b>	2996	1.39
<b>Habano</b>	5064	1.18
<b>Blanco</b>	3211	0.65
<b>Gris</b>	690	0.30

Cuadro 35. Relación de superficie específica, el Valor de Azul pasa N° 200 y el Límite líquido.

SUELO	BALIEN Cm <sup>2</sup> /g PASA No. 200	V.A. PASA N°200 SEGÚN NORMA	L.L.%
<b>Rojizo</b>	5651	1,39	75.5
<b>Habano</b>	6769	1,30	60.0
<b>Blanco</b>	3635	0,65	32.5
<b>Gris</b>	2081	0,46	N.P.

Cuadro 36. Relación de Superficie específica con Valor de Azul pasa N°325.

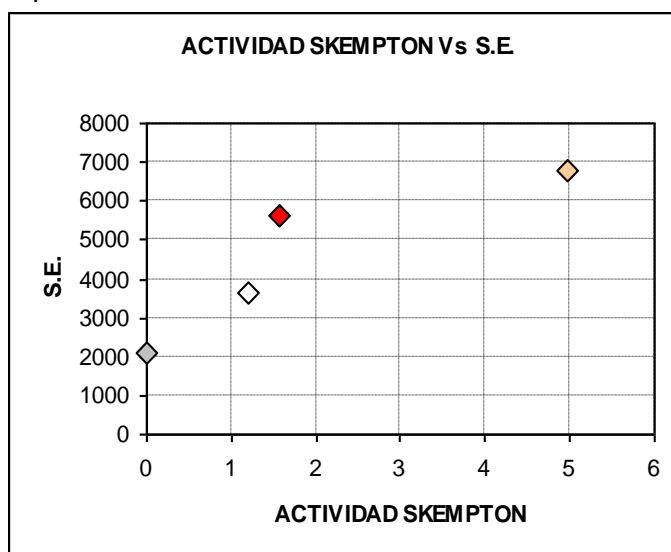
SUELO	BALIEN Cm <sup>2</sup> /g PASA No. 325	V.A. PASA No.325 SEGÚN NORMA
Rojizo	7349	2.44
Habano	9558	2.38
Blanco	3855	0.74
Gris	4309	0.86

Analizando los valores de la actividad, definida por Skempton, en el cuadro 37 y en la figura 33, se observa una clara relación entre la actividad y la superficie específica por Blaine, medida al pasa No. 200.

Cuadro 37. Relación de algunos índices de los suelos analizados

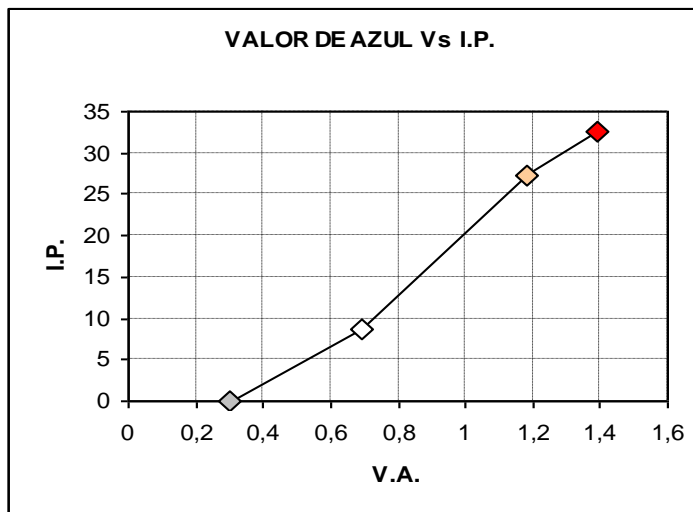
SUELO	ACTIVIDAD DE SKEMPTON	IP	% < 2 µm	Valor de Azul pasa N°40	SUPERFICIE ESPECIFICA cm <sup>2</sup> /g pasa N°200
Rojizo	1.56	32.7	21.0	1.39	5651
Habano	4.96	27.3	5.5	1.18	6769
Blanco	1.19	8.6	7.2	0.65	3635
Gris	0	0	0.7	0.30	2081

Figura 33. Actividad de Skempton vs. Superficie Especifica.



En la figura 34 se observa una buena relación entre el valor de azul y el índice de plasticidad.

Figura 34. Valor de azul vs. Índice de Plasticidad.



Como una forma integral de visualizar la efectividad de los diferentes índices, se comparan los valores respectivos con el comportamiento de los suelos analizados frente al porcentaje de resistencia conservada y al porcentaje de expansión. Como se indica en el cuadro 38.

Cuadro 38. Resultados de los índices evaluados de los suelos en estudio.

SUELO	E.A.	I.P.	V.A.	A	I.G.	% RESISTENCIA CONSERVADA	% EXPANSION
Rojizo	7	32.7	1.39	1.46	20	67	0.08
Habano	10	27.3	1.18	4.96	14	30.5	0.24
Blanco	5	8.6	0.69	1.19	8	30.5	1.9
Gris	72	N.P.	0.30	0	0	73.0	0.03

Según los resultados de este trabajo, ningún índice solo, permite inferir el comportamiento del suelo frente al agua, para analizarlos se deben asociar a un sistema de clasificación en el que se establezcan fronteras de acuerdo con experiencias de desempeño.

En el cuadro 39 se presenta las clasificaciones de los suelos en los tres sistemas considerados en este estudio. Se destaca la clasificación por el sistema Francés,

en el que el suelo habano y el gris quedan en el mismo grupo, su comportamiento frente al agua, y resistencia conservada es igual.

En el sistema AASHTO el suelo rojo y el habano, quedan en el mismo grupo y el comportamiento es muy diferente.

En el suelo gris en que todos los índices detectaron que no había minerales arcillosos nocivos, la clasificación reflejo en los tres sistemas el comportamiento del suelo.

Cuadro 39. Clasificación de los materiales por los sistemas analizados.

SUELO	CLASIFICACION		
	U.S.C.S	AASHTO	FRANCES
Rojizo	MH	A-7-5 (20)	Lma
Habano	MH	A-7-5 (14)	Lta
Blanco	CL	A-4 (8)	Lta
Gris	SW-SM	A-1-b (0)	Sm-SI

## 5. CONCLUSIONES

Como el estudio tenía dos objetivos, el primero relacionado con el procedimiento de ensayo, en el que se buscaba un conocimiento más profundo de la prueba y encontrar recomendaciones para mejorar la repetitividad de la prueba y el segundo referido a la efectividad del valor de azul como índice para calificar los finos presentes en un suelo. Las conclusiones se dividirán en dos grupos.

### 5.1. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA.

- El valor de azul no está afectado de manera significativa por la fracción ensayada, por lo tanto la exigencia de la norma, muestra pasa N° 40, es pertinente y además concuerda con otras normas de ensayo como son las establecidas para realizar los límites de consistencia.
- El tiempo de inmersión que se trabajó en este estudio, buscando favorecer la adsorción de los cationes de azul, aumentó un poco los valores de azul, pero no se presentó un comportamiento contundente que lleve a sugerir incluir este paso en el procedimiento de ensayo. Esta actividad se puede realizar cuando los suelos estén presentando dificultades durante la ejecución de la prueba.
- La norma de ensayo debería permitir realizar la prueba con muestras secas al aire, dado que este manejo hace que los valores de azul sean un poco mayores, situación que origina un incremento en la exigencia en control de calidad de los materiales para ser utilizados en pavimentación de carreteras y simplifica en un paso, que dura como mínimo 12 horas, y el resultado es igualmente confiable. Claro está que no se pueden manejar humedades superiores ya que estas sí inciden de forma errática en los valores de azul.
- En suelos poco y no plásticos se debe iniciar el ensayo con una cantidad menor de azul a la propuesta por la norma INVIAS, (0.05g.) se sugiere 0.02, dado que esta cantidad se puede pesar con precisión en la balanza exigida para esta prueba y es una cantidad adecuada para realizar el ensayo con menos ciclos, (menos adiciones de suelo) y con un resultado contundente o sea se logra un punto donde el líquido sobre nadante este cristalino antes de tornarse turbio con más adiciones de suelos, situación que se presenta sistemáticamente en este tipo de suelos. En este estudio se encontró que la disminución de la cantidad de azul produce pequeños incrementos en el valor de azul, inferiores a la tolerancia exigida, que como se ha venido afirmando con lleva a mejorar el control de calidad dado las especificaciones se refieren a valores máximos permitidos.



- La norma de INVIAS maneja una precisión de 0.02 en el valor de azul que según los resultados de este estudio resulta muy alta, porque modificaciones significativas de procedimiento como es la de cambiar la fracción a ensayar en un suelo, lo que implica variar la concentración de arcilla, arroja valores de azul que seguían cumpliendo con la precisión exigida y además es independiente del valor de azul. Se sugiere manejarla en porcentaje y que no supere el 1%.

## 5.2 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LA EFECTIVIDAD DEL VALOR DE AZUL PARA CALIFICAR LA NOCIDIDAD DE LOS FINOS PRESENTES EN UN SUELO COMPARADA CON LA DE LOS ÍNDICES TRADICIONALES.

- Se confirmó que existe una relación lineal entre el Valor de Azul y el Límite Líquido de un suelo si ambas pruebas se realizan al pasa No 40, por lo tanto cuando se trabaje en suelos de la región en los que se cuente con correlaciones entre estos dos índices, se puede inferir el Límite Líquido a partir del Valor de Azul, importante en suelos finos NP en los que se puede medir el Límite Líquido y este es requerido para clasificarlos en algunos sistemas de clasificación.

- Como índice de la cantidad de minerales arcillosos, %<2 micras, presentes en un suelo es mejor el Valor de Azul que el Equivalente de Arena. Este último está afectado en mayor grado por la cantidad de finos presente en el suelo, %< 74 micras, y el Índice de Plasticidad no presenta una correlación clara con el porcentaje de arcilla o finos nocivos.

- El Equivalente de Arena guarda relación con el Índice de Grupo AASTHO, lo que no sucede con el Valor de Azul.

- Los índices Equivalente de Arena, Valor de Azul e Índice de Grupo no tiene una relación clara aunque los tres tiene básicamente el mismo objetivo en la ingeniería. De los resultados del estudio se concluye que las variables que los afectan no tiene el mismo peso en los tres índices.

- Se encontró una relación clara entre el Valor de Azul, la Superficie Específica (Blaine) y el Límite Líquido, lo que confirma que tanto el Límite Líquido como el Valor de Azul son índices de la superficie específica de los finos presentes en un suelo.

- El Valor de Azul tiene una buena relación con el Índice de Plasticidad, comportamiento que resulta de importancia, porque se tiene en la ingeniería geotécnica tradición en el manejo de este último índice y el Valor de Azul podría sustituir al Índice Plástico en aquellos suelos que resulta muy difícil la determinación del Índice Plástico, en los suelos poco plástico.
- Ninguno de los índices evaluados en este estudio, Valor de Azul, Equivalente de Arena, Índice Plástico e Índice de Grupo por si solo sirve para inferir el comportamiento del suelos frente a cambios de humedad, su eficiencia para ese objetivo esta asociada con los sistemas de clasificación que los utilizan para establecer fronteras entre los diversos grupos contemplados.
- Según los resultados de este trabajo el Valor de Azul asociado al sistema de clasificación francés permitió agrupar los suelos de una mejor manera especialmente cuando se trata de diferenciar y comparar su sensibilidad al agua.

## **6. RECOMENDACIÓN**

La sabiduría esta en la investigación.

La metodología presentada en este trabajo en su aplicación a materiales de suelo que tengan finos nocivos, permite estudiar el comportamiento de este en forma detallada, incorporando de manera formal los parámetros y criterios de la Mecánica de Suelos, a través de los tradicionales índices como son el índice de grupo, el equivalente de arena, el índice de plasticidad, los cuales pueden ser medidos en el Laboratorio.

Este nuevo enfoque tiene múltiples aplicaciones no sólo para el estudio y control de los finos presentes en un suelo, sino también para la selección y explotación de préstamos, así como servir de marco de referencia para el estudio formal de la respuesta del valor de Azul frente a la nocividad de un suelo fino.

## BIBLIOGRAFÍA

RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen I. 1974.

BOWLES, Joseph. Propiedades geofísicas de los suelos. 1982

Estudio sobre el comportamiento y desempeño de los materiales para caminos y los pavimentos. 1996

HURLBUT, Cornelius; Klein, Cornelis. Manual de mineralogía de dana. Tercera edición.

JOSA, A. Un modelo electroplástico para suelos no saturados. Ph. D. Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 1988

PECK, Ralph B.; HANSON, Walter E.; THORNBURN, Thomas H. Ingeniería de cimentaciones. 1982.

SANCHEZ, Leal. Aplicación de RAMCODES en el diseño y control de compactación de suelos. Jornadas del asfalto.

SANCHEZ, Sabogal. Manual de Laboratorio de Pavimentos. 1983.

Norma I.N.V. E-124. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro.

Norma I.N.V. E-125. Determinación del límite líquido.

Norma I.N.V. E-126. Límite plástico e índice de plasticidad.

Norma I.N.V. E-127. Determinación del límite de contracción.

Norma I.N.V. E-128. Peso específico.

Norma I.N.V. E-133. Equivalente de arena.

Norma I.N.V. E-203. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Norma I.N.V. E-235. Valoración de elementos arcillosos en los materiales finos por medio del azul de metileno.

[www.unicon.com.pe/articulos/ar-053.htm](http://www.unicon.com.pe/articulos/ar-053.htm)

[www.rincondelvago.com/adsorcion.html](http://www.rincondelvago.com/adsorcion.html)

[www.drpez.com/diccionario/term/afab5ca55eada6ad,,xhtml](http://www.drpez.com/diccionario/term/afab5ca55eada6ad,,xhtml)

Norma I.N.V. E-302. Finura del cemento Pórtland. Método de aparato Blaine.

Norma N.L.T. -171/90. Valoración de elementos arcillosos en los materiales finos por medio del azul de metileno.

**ANEXO A**  
**RESULTADOS DE LABORATORIO**  
**SUELO ROJIZO**





**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color rojizo. **Muestra Nº :** 1 **Fecha :** Noviembre de 2005

**ANALISIS GRANULOMETRICO - METODO DEL HIDROMETRO**

Hidrómetro Nº :	681169	Agente floculante :	Calgón.
Densidad de sólidos :	2,700	Cantidad floculante :	5 g.
Peso de sólidos :	55 g.	Corrección por floculante:	- 6
Corrección por menisco :	± 1		

Tiempo Transcurrido (min)	Temperatura °C	Lectura de Hidrometro (R')	Lectura Corregida (R' + cm) R	Profundidad efectiva (L)	Diametro de oartículas D (mm)	Ct	R - Cd ± Ct	Porcentaje más fino	
								Parcial	Total
1	20,2	53	54	8,2	0,037747	0,06	48,06	87,82	67,3
2	20,2	51	52	8,6	0,027335	0,06	46,06	84,16	64,5
5	20,2	43	44	10,2	0,018828	0,06	38,06	69,54	53,3
15	20,5	36	37	11,5	0,011500	0,15	31,15	56,92	43,6
30	20,6	32	33	12,3	0,008400	0,18	27,18	49,66	38,0
60	20,7	28	29	13,0	0,006099	0,21	23,21	42,41	32,5
120	21,0	25	26	13,6	0,004395	0,30	20,30	37,09	28,4
250	21,0	22	23	14,0	0,003089	0,30	17,30	31,61	24,2
1440	21,0	17	18	15,2	0,001341	0,30	12,30	22,47	17,2

**Observaciones :** \_\_\_\_\_

Victoria Eugenia Muñoz Valencia.  
Carlos Andrés Manrique Castro.





Universidad del Cauca  
 Facultad de Ingeniería Civil  
 Laboratorio de Suelos y Pavimentos

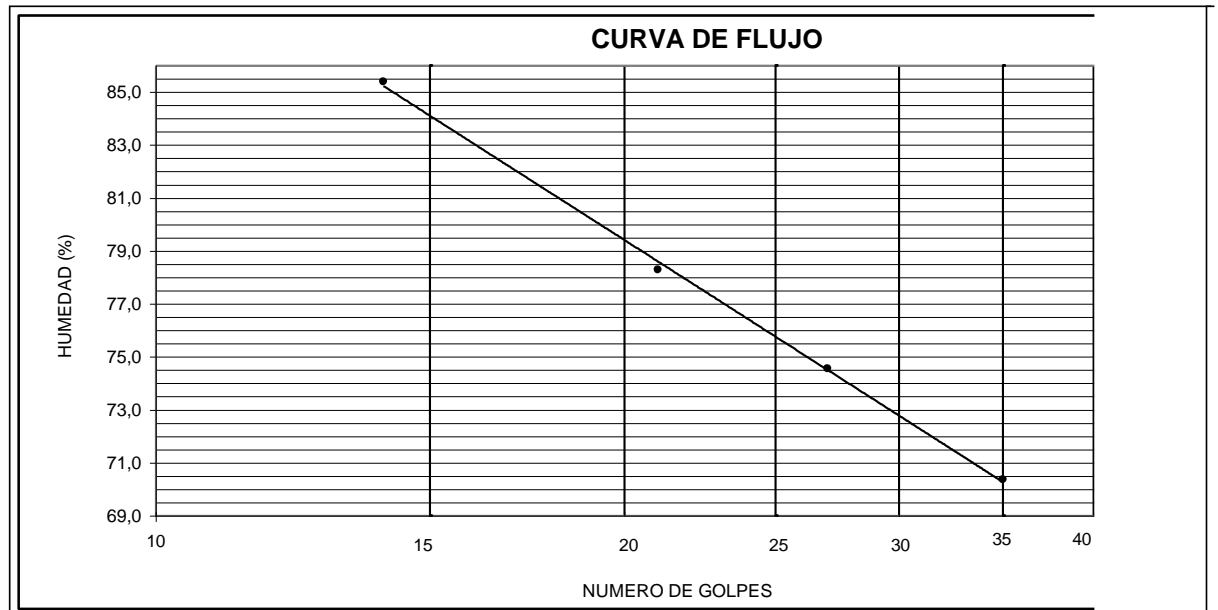
### LIMITES DE ATTERBERG

**Obra** : Tesis de Grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción** : Suelo color rojizo. Muestra N°1.

**Fecha** : Septiembre de 2004

Prueba	LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
	1	2	3	4	1	2
N° de Golpes	14	21	27	35	—	—
Peso del recipiente (gr)	14,87	14,97	14,77	13,67	15,63	13,04
Recipiente + suelo húmedo(gr)	34,80	35,42	36,52	33,57	37,76	26,68
Recipiente + suelo seco. (gr)	25,62	26,44	27,23	25,35	31,13	22,59
Peso del agua. (gr)	9,18	8,98	9,29	8,22	6,63	4,09
Peso suelo seco. (gr)	10,75	11,47	12,46	11,68	15,50	9,55
Humedad (%)	85,4	78,3	74,6	70,4	42,8	42,8



#### RESULTADOS

Limite Liquido (%)	<u>75,5</u>
Limite Plástico (%)	<u>42,8</u>
Limite de Contracción	<u>**</u>
Clasificación S.U.C.S	<u>MH</u>

#### INDICE

Indice de Plasticidad (%)	<u>32,7</u>
Indice de Fluidez	<u>**</u>
Indice de Tenacidad	<u>**</u>

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**Obra** : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción** : Suelo fino color rojizo. Muestra N°1. **Fecha** : Septiembre de 2004

**LIMITE DE CONTRACCION**

PRUEBA		1	2	3
Cápsula		1	2	
Wc	(g.)	48,88	18,88	
W	(g.)	41,82	42,01	
Ws	(g.)	31,60	31,69	
Wo	(g.)	12,770	12,81	
V	(cm <sup>3</sup> )	15,03	15,04	
Vo	(cm <sup>3</sup> )	8,23	8,32	
W - Ws	(g.)	10,22	10,32	
V - Vo	(cm <sup>3</sup> )	6,8	6,72	
<b>M</b> = $\frac{W - Ws}{Wo} \times 100$	(%)	80,03	80,56	
<b>S</b> = $M - \frac{V - Vo}{Wo} \times 100$	(%)	26,78	28,10	

Wc : peso cápsula	Vo : volumen galleta seca
W : peso galleta húmeda + cápsula	M : contenido de humedad
Ws : peso galleta seca + cápsula	S : límite de contracción
Wo : peso galleta seca	R : relación de contracción
V : volumen galleta húmeda	Cv : cambio volumétrico

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Materiales, Suelos y pavimentos

**ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA**

**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción :** Suelo color rojizo.

**Muestra N° :** 1 **Fecha :** Septiembre - 2004

ENSAYO N°	1	2	3	PROMEDIO	
Lectura del nivel de arena (Ls)	0,9	0,9	0,9		
Lectura del nivel de arcilla (Lc)	13,7	13,4	13,4		
Equivalente de arena = $\frac{Ls}{Lc} \times 100$	7	7	7	7	
Condiciones de la arena para el ensayo:					
Humeda	<input type="checkbox"/>	Seca al aire	<input checked="" type="checkbox"/>	Seca al horno	<input type="checkbox"/>

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
Carlos Andrés Mnarique Castro



Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : Suelo color rojizo.

Muestra N° : 1 Fecha : Septiembre de 2004

**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SUELOS FINOS**

PRUEBA	1	2	3	4
Temperatura (°C)	26,8	26,8		
Matraz N°	8	6		
Wf <sub>w</sub> (g.)	645,40	662,97		
Wf <sub>sw</sub> (g.)	680,70	698,80		
Ws (g.)	55,39	56,05		
K	0,9998	0,9998		
Ws + Wf <sub>w</sub> - Wf <sub>sw</sub> (g.)	20,09	20,22		
S <sub>s</sub> * G	2,753	2,766		

Wf<sub>w</sub> : peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase. (curva de calibración).  
 Wf<sub>sw</sub> : peso matraz + agua + suelo.  
 Ws : peso suelo seco.  
 Ws + Wf<sub>w</sub> - Wf<sub>sw</sub> = volumen desalojado.  
 S = peso especifico relativo de los sólidos.

$$S = \frac{Ws * K}{Ws + Wf_w - Wf_{sw}}$$

T (°C)	D <sub>R</sub>	K
18	0,9986244	1,0004
19	0,9984347	1,0002
20	0,9982343	1,0000
21	0,9980233	0,9998
22	0,9978018	0,9996
23	0,9975702	0,9993
24	0,9973286	0,9991
25	0,9970770	0,9989
26	0,9968156	0,9986
27	0,9965451	0,9983
28	0,9962652	0,9980
29	0,9959761	0,9977
30	0,9956780	0,9974

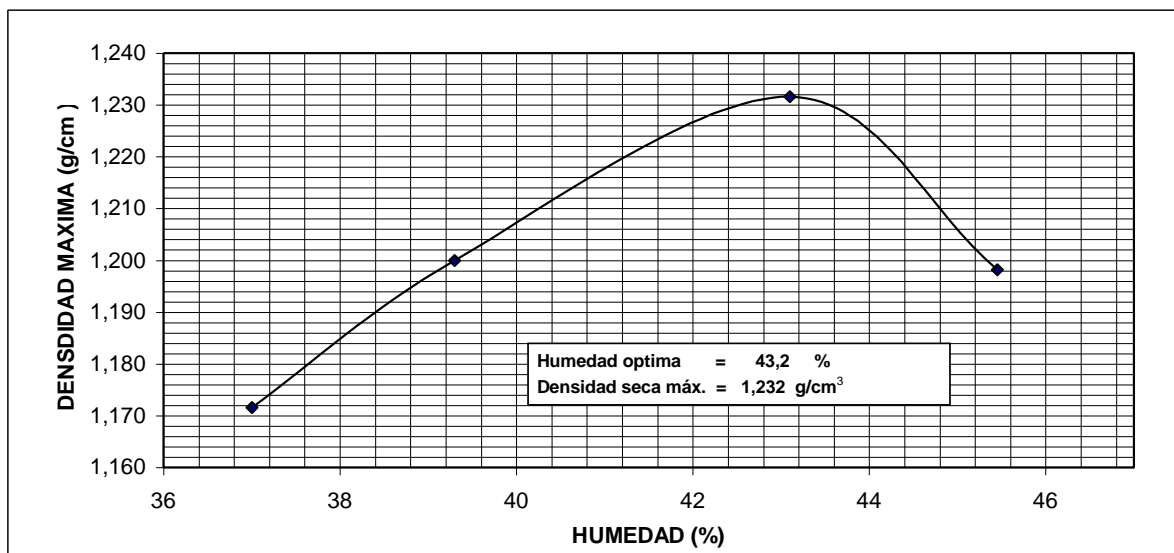
Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**ENSAYO DE COMPACTACION**

**Obra** : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción** : Suelo color rojizo. **Muestra N°** : 1  
**Método** : Harvard miniatura **Fecha** : 15 - 10 - 2004

Prueba N°	1	2	3	4	
N° de golpes	25	25	25	25	
Humedad deseada (%)	38	41	44	47	
Humedad inicial de la muestra (%)	28	28	28	28	
Humedad adicional (%)	10	13	16	19	
Peso muestra húmeda (g.)	150	150	150	150	
Peso muestra seca (g.)	117,2	117,2	117,2	117,2	
Agua adicional (cm <sup>3</sup> )	11,7	15,2	18,8	22,3	
Molde N°	2	1	1	1	
Peso muestra húmeda más molde (g.)	229,62	233,66	239,21	238,01	
Peso molde (g.)	131,71	131,7	131,7	131,7	
Peso muestra húmeda (g.)	97,91	101,96	107,51	106,31	
Humedad de horno (%)	37,00	39,30	43,10	45,45	
Peso muestra seca (g.)	71,5	73,2	75,1	73,1	
Volumen del molde (cm)	61,0	61,0	61,0	61,0	
Densidad muestra seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,172	1,200	1,232	1,198	
C	Expansión primer día. 0,001"				
	Expansión segundo día. 0,001"				
B	Expansión tercer día. 0,001"				
	Expansión cuarto día. 0,001"				
R	Expansión (%)				



Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : Suelo color rojizo.

Muestra Nº : 1

Fecha : Octubre de 2004

### SENSIBILIDAD AL AGUA - EXPANSION

No. de golpes	25	25
Humedad deseada. %	42,5	42,5
Humedad inicial de la muestra. %	31,44	31,44
Humedad adicional. %	11,06	11,06
Peso muestra húmeda. Gr	150,0	150,0
Peso muestra seca. Gr	114,1	114,1
Agua adicional. Cc	12,6	12,6
Molde No.	1	2
Peso muestra húmeda más molde. Gr.	237,55	287,43
Peso molde. Gr.	131,62	182,25
Peso muestra húmeda. Gr.	105,93	105,18
Húmedad de horno. %	41,2	41,2
Peso muestra seca. Gr	75,0	74,5
Volumen del molde. Cc	60,5	60,5
Densidad muestra seca. Gr/cc	1,240	1,231
Penetración inicial antes inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	2,1	2,1
Penetración final despues inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	1,5	1,25

Resultados expansión (0.001")		
Tiempo min.	Molde No. 1	Molde No. 2
1	1,0	0,1
2	1,0	0,2
5	1,0	1,0
10	1,1	1,1
15	1,3	1,1
20	1,5	1,5
25	1,7	1,7
30	1,9	1,9
60	1,9	1,9
210	2,0	2,0
1227	2,1	2,0
1440	2,1	2,1
%expansión	0,08	0,08

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
Carlos Andrés Manrique Castro

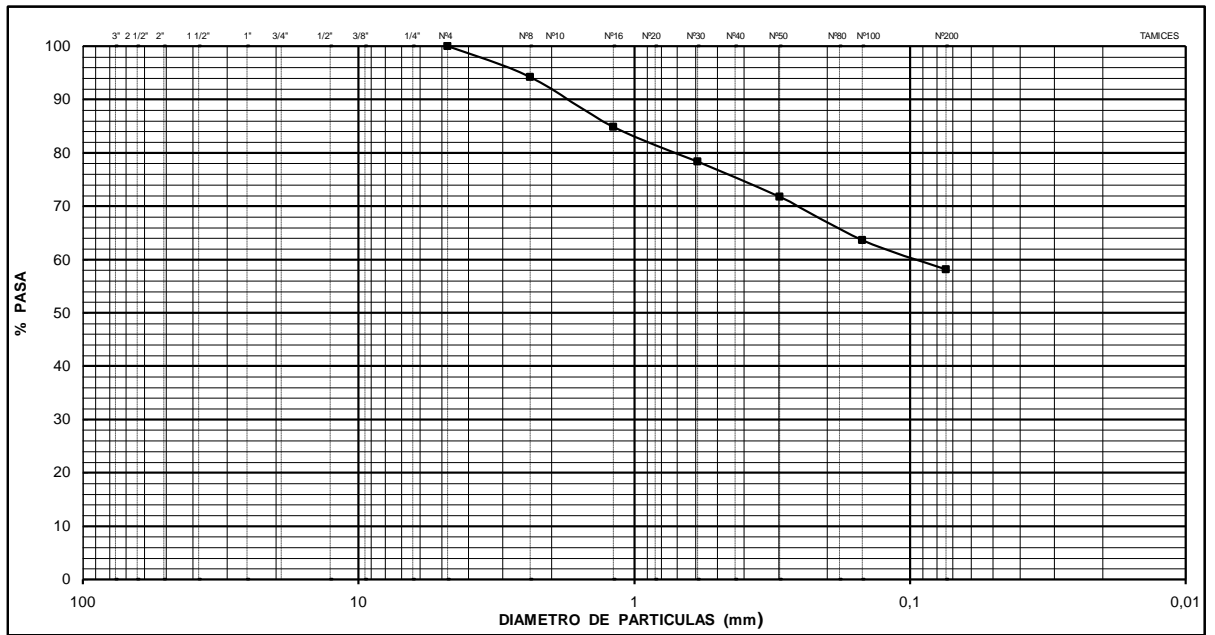
**ANEXO B**  
**RESULTADOS DE LABORATORIO**  
**SUELO HABANO**



Universidad del Cauca  
 Facultad de Ingeniería Civil  
 Laboratorio de Materiales, Suelos y pavimentos

**ANALISIS GRANULOMETRICO**

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
 Descripción : Suelo color habano. Muestra N° : 2 Fecha : Septiembre/04



TAMICES	PESO RETENIDO (g.)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
N° 4	0,0	0	0	100
N° 8	30,05	5,8	5,8	94,2
N° 16	49,19	9,4	15,2	84,8
N° 30	33,79	6,5	21,7	78,3
N° 50	34,35	6,6	28,2	71,8
N° 100	42,47	8,1	36,4	63,6
N° 200	28,91	5,5	41,9	58,1
P - 200	303,11	58,1	100,0	***

**COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD**

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

**COEFICIENTE DE CURVATURA**

$$C_c = \frac{D_{(30)}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

**CLASIFICACION**

AASHO \_\_\_\_\_  
 USCE \_\_\_\_\_

Observaciones : P<sub>1</sub> = 521,87 g.

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro





Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
Descripción : Suelo color habano. Muestra N° : 2 Fecha : Noviembre de 2005

**ANALISIS GRANULOMETRICO - METODO DEL HIDROMETRO**

Hidrómetro N° :	681169	Agente floculante :	Calgón.
Densidad de sólidos :	2,657	Cantidad floculante :	5 g.
Peso de sólidos :	55 g.	Corrección por floculante:	- 6
Corrección por menisco :	± 1		

Tiempo Transcurrido (min)	Temperatura °C	Lectura de Hidrometro (R')	Lectura Corregida (R' + cm) R	Profundidad efectiva (L)	Diametro de oartículas D (mm)	Ct	R - Cd ± Ct	Porcentaje más fino	
								Parcial	Total
1	20,4	49	50	9,0	0,040660	0,12	44,12	80,09	46,5
2	20,4	44	45	10,5	0,031050	0,12	39,12	71,01	41,2
5	20,4	36	37	11,5	0,025540	0,12	31,12	56,49	32,8
15	20,4	29	30	12,8	0,012519	0,12	24,12	43,78	25,4
30	20,4	25	26	13,6	0,009125	0,12	20,12	36,52	21,2
60	20,4	21	22	14,4	0,006640	0,12	16,12	29,26	17,0
120	20,5	18	19	14,9	0,004770	0,15	13,15	23,87	13,9
250	21,2	15	16	15,5	0,003342	0,36	10,36	18,81	10,9
1440	19,5	10	11	16,5	0,001626	1,85	3,15	5,72	3,3

Observaciones : \_\_\_\_\_

Victoria Eugenia Muñoz Valencia.  
Carlos Andrés Manrique Castro.



Universidad del Cauca  
 Facultad de Ingeniería Civil  
 Laboratorio de Suelos y Pavimentos

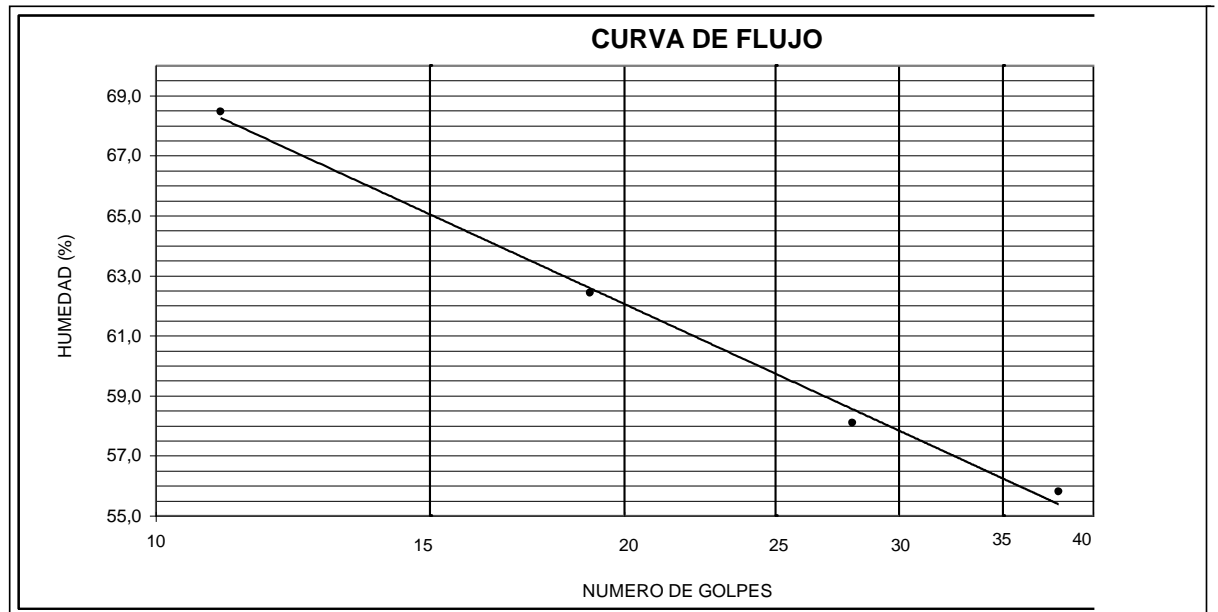
### LIMITES DE ATTERBERG

**Obra** : Tesis de Grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción** : Suelo color habano. Muestra N°2.

**Fecha** : Septiembre de 2004

Prueba	LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
	1	2	3	4	1	2
N° de Golpes	11	19	28	38	—	—
Peso del recipiente (gr)	13,34	11,40	15,38	12,22	14,83	12,78
Recipiente + suelo húmedo(gr)	45,13	37,55	36,66	34,64	47,52	44,90
Recipiente + suelo seco. (gr)	32,21	27,50	28,84	26,61	39,51	36,94
Peso del agua. (gr)	12,92	10,05	7,82	8,03	8,01	7,96
Peso suelo seco. (gr)	18,87	16,10	13,46	14,39	24,68	24,16
Humedad (%)	68,5	62,4	58,1	55,8	32,5	32,9



#### RESULTADOS

Limite Liquido (%)	<u>60,0</u>
Limite Plástico (%)	<u>32,7</u>
Limite de Contracción	<u>**</u>
Clasificación S.U.C.S	<u>MH</u>

#### INDICE

Indice de Plasticidad (%)	<u>27,3</u>
Indice de Fluidez	<u>**</u>
Indice de Tenacidad	<u>**</u>

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
 Descripción : Suelo fino color habano. Muestra N°2. Fecha : Septiembre de 2004

**LIMITE DE CONTRACCION**

PRUEBA		1	2	3
Cápsula		1	2	
Wc	(g.)	20,569	20,402	
W	(g.)	49,006	48,361	
Ws	(g.)	39,039	38,575	
Wo	(g.)	18,470	18,173	
V	(cm <sup>3</sup> )	22,268	16,857	
Vo	(cm <sup>3</sup> )	17,682	12,514	
W - Ws	(g.)	9,967	9,786	
V - Vo	(cm <sup>3</sup> )	4,586	4,343	
<b>M =</b> $\frac{W - Ws}{Wo} \times 100$	(%)	53,96	53,85	
<b>S =</b> $M - \frac{V - Vo}{Wo} \times 100$	(%)	29,13	29,95	

Wc : peso cápsula	Vo : volumen galleta seca
W : peso galleta húmeda + cápsula	M : contenido de humedad
Ws : peso galleta seca + cápsula	S : límite de contracción
Wo : peso galleta seca	R : relación de contracción
V : volumen galleta húmeda	Cv : cambio volumétrico

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**Obra** : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción** : Suelo fino color habano. Muestra N°2. **Fecha** : Septiembre de 2004

**LIMITE DE CONTRACCION**

PRUEBA		1	2	3
Cápsula		1	2	
Wc	(g.)	20,569	20,402	
W	(g.)	49,006	48,361	
Ws	(g.)	39,039	38,575	
Wo	(g.)	18,470	18,173	
V	(cm <sup>3</sup> )	22,268	16,857	
Vo	(cm <sup>3</sup> )	17,682	12,514	
W - Ws	(g.)	9,967	9,786	
V - Vo	(cm <sup>3</sup> )	4,586	4,343	
<b>M</b> = $\frac{W - Ws}{Wo} \times 100$	(%)	53,96	53,85	
<b>S</b> = $M - \frac{V - Vo}{Wo} \times 100$	(%)	29,13	29,95	

Wc : peso cápsula	Vo : volumen galleta seca
W : peso galleta húmeda + cápsula	M : contenido de humedad
Ws : peso galleta seca + cápsula	S : límite de contracción
Wo : peso galleta seca	R : relación de contracción
V : volumen galleta húmeda	Cv : cambio volumétrico

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color habano.  
**Muestra N° :** 2 **Fecha :** Septiembre de 2004

**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SUELOS FINOS**

PRUEBA	1	2	3	4
Temperatura (°C)	24,1	24,1		
Matraz N°	1	10		
Wf <sub>w</sub> (g.)	685,30	698,26		
Wf <sub>sw</sub> (g.)	650,32	663,15		
Ws (g.)	56,12	56,21		
K	0,9991	0,9991		
Ws + Wf <sub>w</sub> - Wf <sub>sw</sub> (g.)	21,14	21,10		
S <sub>s</sub> * G	2,652	2,662		

**Wf<sub>w</sub>** : peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase. (curva de calibración).  
**Wf<sub>sw</sub>** : peso matraz + agua + suelo.  
**Ws** : peso suelo seco.  
**Ws + Wf<sub>w</sub> - Wf<sub>sw</sub>** = volumen desalojado.  
**S** = peso especifico relativo de los sólidos.

$$S = \frac{Ws * K}{Ws + Wf_w - Wf_{sw}}$$

T (°C)	D <sub>R</sub>	K
18	0,9986244	1,0004
19	0,9984347	1,0002
20	0,9982343	1,0000
21	0,9980233	0,9998
22	0,9978018	0,9996
23	0,9975702	0,9993
24	0,9973286	0,9991
25	0,9970770	0,9989
26	0,9968156	0,9986
27	0,9965451	0,9983
28	0,9962652	0,9980
29	0,9959761	0,9977
30	0,9956780	0,9974

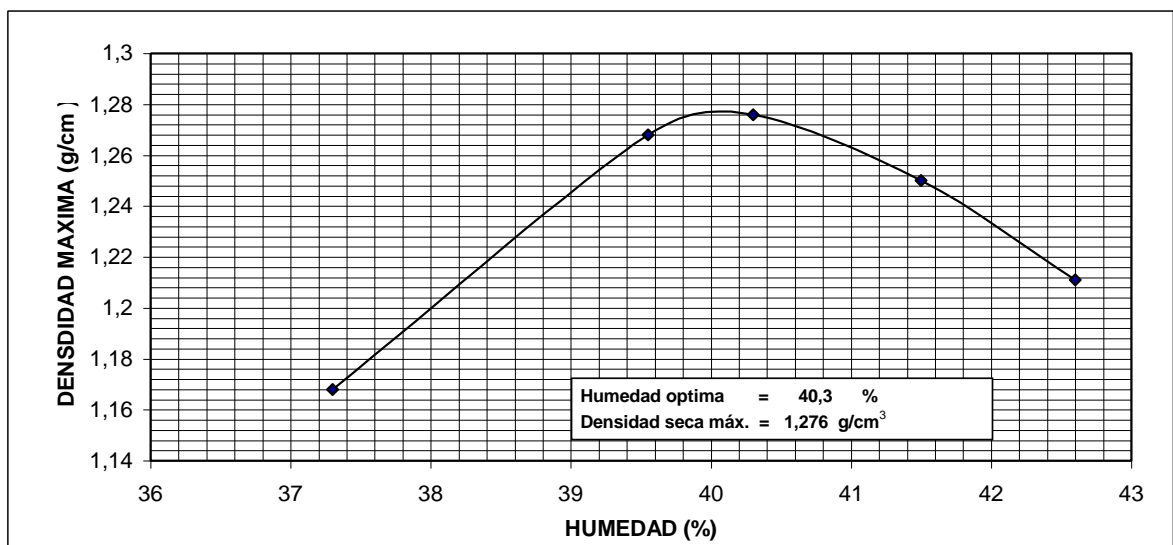
Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**ENSAYO DE COMPACTACION**

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
 Descripción : Suelo color habano. Muestra Nº : 2  
 Método : Harvard miniatura Fecha : 15 - 10 - 2004

Prueba Nº	1	2	3	4	
Nº de golpes		25	25	25	
Humedad deseada (%)		37	40	43	
Humedad inicial de la muestra (%)		20,2	20,2	20,2	
Humedad adicional (%)		16,8	19,8	22,8	
Peso muestra húmeda (g.)		0	0	0	
Peso muestra seca (g.)		150	150	150	
Agua adicional (cm <sup>3</sup> )		25,2	29,7	34,2	
Molde Nº		2	1	1	
Peso muestra húmeda más molde (g.)		229,57	239,65	237,01	
Peso molde (g.)		131,74	131,7	131,7	
Peso muestra húmeda (g.)		97,83	107,95	105,31	
Humedad de horno (%)		37,30	39,55	42,60	
Peso muestra seca (g.)		71,25	77,36	73,85	
Volumen del molde (cm)		61,0	61,0	61,0	
Densidad muestra seca (g/cm <sup>3</sup> )		1,168	1,268	1,211	
C	Expansión primer día. 0,001"				
	Expansión segundo día. 0,001"				
B	Expansión tercer día. 0,001"				
R	Expansión cuarto día. 0,001"				
	Expansión (%)				



Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Universidad del Cauca  
 Facultad de Ingeniería Civil  
 Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : Suelo color habano.

Muestra N° : 2

Fecha : Octubre de 2004

**SENSIBILIDAD AL AGUA - EXPANSION**

No. de golpes	25	25
Humedad deseada. %	38,0	38,0
Humedad inicial de la muestra. %	25,7	25,7
Humedad adicional. %	12,3	12,3
Peso muestra húmeda. Gr	150,0	150,0
Peso muestra seca. Gr	119,3	119,3
Agua adicional. Cc	14,7	14,7
Molde No.	1	2
Peso muestra húmeda más molde. Gr.	238,13	286,52
Peso molde. Gr.	131,56	182,21
Peso muestra húmeda. Gr.	106,57	104,31
Húmedad de horno. %	37,88	37,88
Peso muestra seca. Gr	77,3	75,7
Volumen del molde. Cc	60,5	60,5
Densidad muestra seca. Gr/cc	1,278	1,250
Penetración inicial antes inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	4,5	4,1
Penetración final despues inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	1,2	1,4

Resultados expansión (0.001")		
Tiempo min.	Molde No. 1	Molde No. 2
1	0,9	0,9
2	1,0	1,0
3	1,0	2,0
5	1,1	2,5
10	2,0	3,0
15	2,5	4,0
20	3,0	4,9
30	3,5	5,0
60	4,0	6,0
180	5,0	7,0
1260	5,0	7,5
2700	5,0	8,0
%expansión	0,18	0,29

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro

**ANEXO C**  
**RESULTADOS DE LABORATORIO**  
**SUELO BLANCO**

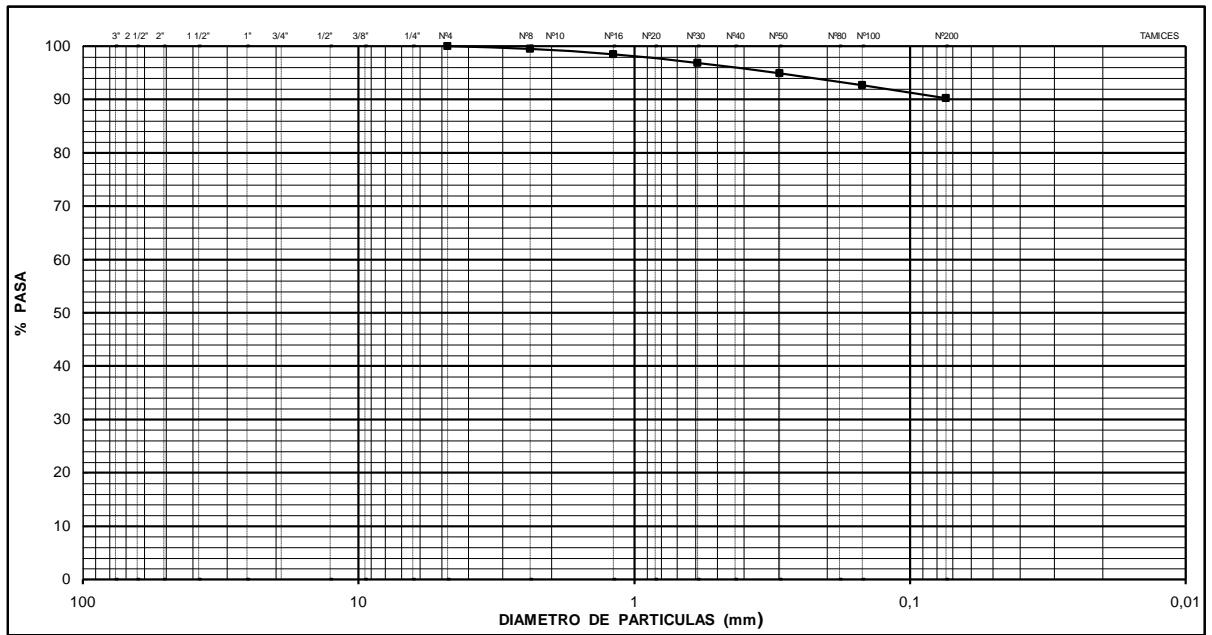




**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : Suelo color blanco. Muestra N° : 3 Fecha : Septiembre/04



TAMICES	PESO RETENIDO (g.)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
N° 4	0,0	0	0	100
N° 8	1,73	0,5	0,5	99,5
N° 16	4,03	1,1	1,5	98,5
N° 30	5,83	1,6	3,1	96,9
N° 50	7,40	2,0	5,1	94,9
N° 100	8,36	2,2	7,3	92,7
N° 200	9,24	2,5	9,8	90,2
P - 200	337,09	90,2	100,0	***

**COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD**

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

**COEFICIENTE DE CURVATURA**

$$C_c = \frac{D(30)^2}{D_{10} * D_{60}}$$

**CLASIFICACION**

AASHO \_\_\_\_\_  
 USCE \_\_\_\_\_

Observaciones : P<sub>1</sub> = 373,68 g.

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color blanco. **Muestra Nº :** 3 **Fecha :** Noviembre de 2005

**ANALISIS GRANULOMETRICO - METODO DEL HIDROMETRO**

Hidrómetro Nº :	681169	Agente floculante :	Calgón.
Densidad de sólidos :	2,700	Cantidad floculante :	5 g.
Peso de sólidos :	55 g.	Corrección por floculante:	- 6
Corrección por menisco :	± 1		

Tiempo Transcurrido (min)	Temperatura °C	Lectura de Hidrometro (R')	Lectura Corregida (R' + cm) R	Profundidad efectiva (L)	Diametro de oartículas D (mm)	Ct	R - Cd ± Ct	Porcentaje más fino	
								Parcial	Total
1	19,7	55	56	7,8	0,0388513	0,09	49,91	91,80	82,8
2	19,7	51	52	8,6	0,0288465	0,09	45,91	84,44	76,2
5	19,7	42	43	10,4	0,0200627	0,09	36,91	67,88	61,2
15	19,7	30	31	12,6	0,0127500	0,09	24,91	45,81	41,3
30	19,9	24	25	13,8	0,0094118	0,03	18,97	34,90	31,5
60	20,0	19	20	14,7	0,0068604	0,00	14,00	27,54	24,8
120	20,0	14	15	15,7	0,0050133	0,00	9,00	16,56	14,9
250	20,5	12	13	16,1	0,0034957	0,15	7,15	13,15	11,9
1440	18,7	8	9	16,9	0,0015258	0,36	2,64	4,86	4,4

**Observaciones :** \_\_\_\_\_

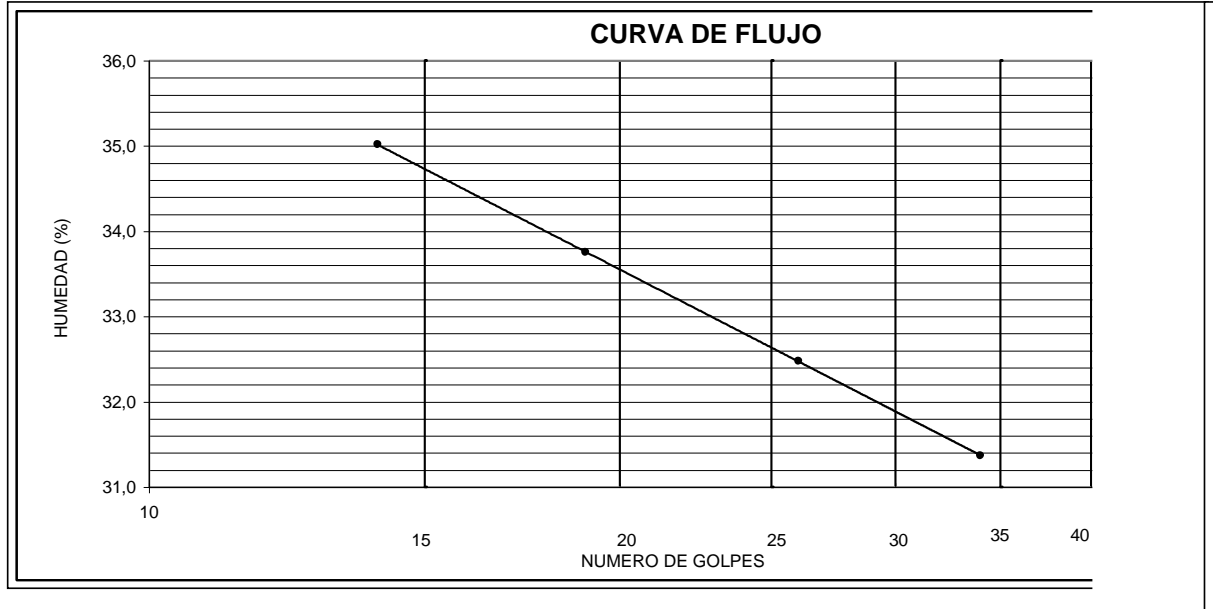
Victoria Eugenia Muñoz Valencia.  
Carlos Andrés Manrique Castro.



**LIMITES DE ATTERBERG**

**Obra** : Tesis de Grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción** : Suelo color blanco. Muestra N°3. **Fecha** : Septiembre de 2004

	LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
	1	2	3	4	1	2
Prueba						
N° de Golpes	14	19	26	34		
Peso del recipiente (gr)	14,70	14,83	13,59	12,42	11,84	12,44
Recipiente + suelo húmedo(gr)	29,66	32,78	30,15	31,85	33,48	29,73
Recipiente + suelo seco. (gr)	25,78	28,25	26,09	27,21	29,29	26,41
Peso del agua. (gr)	3,88	4,53	4,06	4,64	4,19	3,32
Peso suelo seco. (gr)	11,08	13,42	12,50	14,79	17,45	13,97
Humedad (%)	35,0	33,8	32,5	31,4	24,0	23,8



**RESULTADOS**

Limite Liquido (%)	<u>32,5</u>
Limite Plástico (%)	<u>23,9</u>
Limite de Contracción	<u>**</u>
Clasificación S.U.C.S	<u>CL</u>

**INDICE**

Indice de Plasticidad (%)	<u>8,6</u>
Indice de Fluidez	<u>**</u>
Indice de Tenacidad	<u>**</u>

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**Obra** : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción** : Suelo fino color blanco. Muestra N°3. **Fecha** : Septiembre de 2004

**LIMITE DE CONTRACCION**

PRUEBA		1	2	3
Cápsula		1	2	3
Wc	(g.)	18,929	22,675	
W	(g.)	47,161	48,267	
Ws	(g.)	40,465	42,345	
Wo	(g.)	21,536	19,670	
V	(cm <sup>3</sup> )	15,106	13,673	
Vo	(cm <sup>3</sup> )	13,435	12,278	
W - Ws	(g.)	6,696	5,922	
V - Vo	(cm <sup>3</sup> )	1,671	1,395	
<b>M</b> = $\frac{W - Ws}{Wo} \times 100$	(%)	31,09	30,11	
<b>S</b> = $M - \frac{V - Vo}{Wo} \times 100$	(%)	23,33	23,01	

Wc : peso cápsula	Vo : volumen galleta seca
W : peso galleta húmeda + cápsula	M : contenido de humedad
Ws : peso galleta seca + cápsula	S : límite de contracción
Wo : peso galleta seca	R : relación de contracción
V : volumen galleta húmeda	Cv : cambio volumétrico

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Materiales, Suelos y pavimentos

**ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA**

**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción :** Suelo color blanco.

**Muestra N° :** 3 **Fecha :** Septiembre - 2004

ENSAYO N°	1	2	3	PROMEDIO	
Lectura del nivel de arena (Ls)	0,5	0,5	0,5		
Lectura del nivel de arcilla (Lc)	11,5	11,4	11,2		
Equivalente de arena = $\frac{Ls}{Lc} \times 100$	5	5	5	5	
Condiciones de la arena para el ensayo:					
Humeda	<input type="checkbox"/>	Seca al aire	<input checked="" type="checkbox"/>	Seca al horno	<input type="checkbox"/>

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
Carlos Andrés Mnrique Castro



**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color blanco.  
**Muestra N° :** 3 **Fecha :** Septiembre de 2004

**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SUELOS FINOS**

PRUEBA	1	2	3	4
Temperatura (°C)	21,8	21,6		
Matraz N°	1	6		
Wf <sub>w</sub> (g.)	646,05	663,75		
Wf <sub>sw</sub> (g.)	684,33	701,54		
Ws (g.)	62,26	61,31		
K	0,9996	0,9996		
Ws + Wf <sub>w</sub> - Wf <sub>sw</sub> (g.)	23,98	23,52		
S <sub>s</sub> * G	2,595	2,606		

Wf<sub>w</sub> : peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase. (curva de calibración).  
 Wf<sub>sw</sub> : peso matraz + agua + suelo.  
 Ws : peso suelo seco.  
 Ws + Wf<sub>w</sub> - Wf<sub>sw</sub> = volumen desalojado.  
 S = peso especifico relativo de los sólidos.

$$S = \frac{Ws * K}{Ws + Wf_w - Wf_{sw}}$$

T (°C)	D <sub>R</sub>	K
18	0,9986244	1,0004
19	0,9984347	1,0002
20	0,9982343	1,0000
21	0,9980233	0,9998
22	0,9978018	0,9996
23	0,9975702	0,9993
24	0,9973286	0,9991
25	0,9970770	0,9989
26	0,9968156	0,9986
27	0,9965451	0,9983
28	0,9962652	0,9980
29	0,9959761	0,9977
30	0,9956780	0,9974

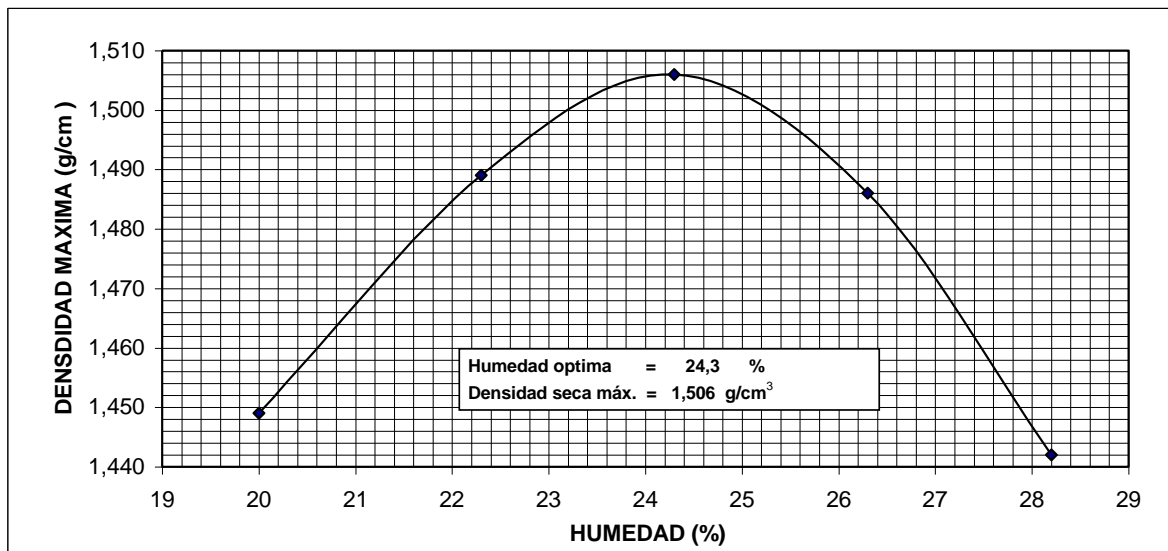
Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**ENSAYO DE COMPACTACION**

**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color blanco. **Muestra N° :** 3  
**Método :** Harvard miniatura **Fecha :** 15 - 10 - 2004

Prueba N°	1	2	3	4	
N° de golpes	25	25	25	25	
Humedad deseada (%)	21	24	27	30	
Humedad inicial de la muestra (%)	5,5	5,5	5,5	5,5	
Humedad adicional (%)	15,5	18,5	21,5	24,5	
Peso muestra húmeda (g.)	150	150	150	150	
Peso muestra seca (g.)	142,2	142,2	142,2	142,2	
Agua adicional (cm <sup>3</sup> )	22,0	26,3	30,6	34,8	
Molde N°	1	1	1	1	
Peso muestra húmeda más molde (g.)	237,79	242,85	246,23	244,50	
Peso molde (g.)	131,74	131,74	131,74	131,74	
Peso muestra húmeda (g.)	106,05	111,11	114,49	112,76	
Humedad de horno (%)	20,0	22,3	26,3	28,2	
Peso muestra seca (g.)	88,40	90,85	90,65	87,96	
Volumen del molde (cm)	61,0	61,0	61,0	61,0	
Densidad muestra seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,449	1,489	1,486	1,442	
C	Expansión primer día. 0,001"				
	Expansión segundo día. 0,001"				
B	Expansión tercer día. 0,001"				
R	Expansión cuarto día. 0,001"				
	Expansión (%)				



Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : Suelo color blanco.

Muestra N° : 3

Fecha : Octubre de 2004

### SENSIBILIDAD AL AGUA - EXPANSION

No. de golpes	25	25
Humedad deseada. %	24,3	24,3
Humedad inicial de la muestra. %	13,57	13,57
Humedad adicional. %	10,73	10,73
Peso muestra húmeda. Gr	150,0	150,0
Peso muestra seca. Gr	132,1	132,1
Agua adicional. Cc	14,2	14,2
Molde No.	1	2
Peso muestra húmeda más molde. Gr.	241,37	289,76
Peso molde. Gr.	131,67	182,2
Peso muestra húmeda. Gr.	109,7	107,56
Húmedad de horno. %	23,85	23,85
Peso muestra seca. Gr	88,6	86,8
Volumen del molde. Cc	60,5	60,5
Densidad muestra seca. Gr/cc	1,464	1,435
Penetración inicial antes inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	>4.5	>4.5
Penetración final despues inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	0	0

Resultados expansión (0.001")		
Tiempo min.	Molde No. 1	Molde No. 2
1	4	8
2	7	10
5	16	14
10	28	17,5
15	34,5	20
20	40	21
30	45	22,5
160	59	29
220	62	31
1227	64,5	31
1440	64,5	38
%Expansión	2,33	1,37

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
Carlos Andrés Manrique Castro



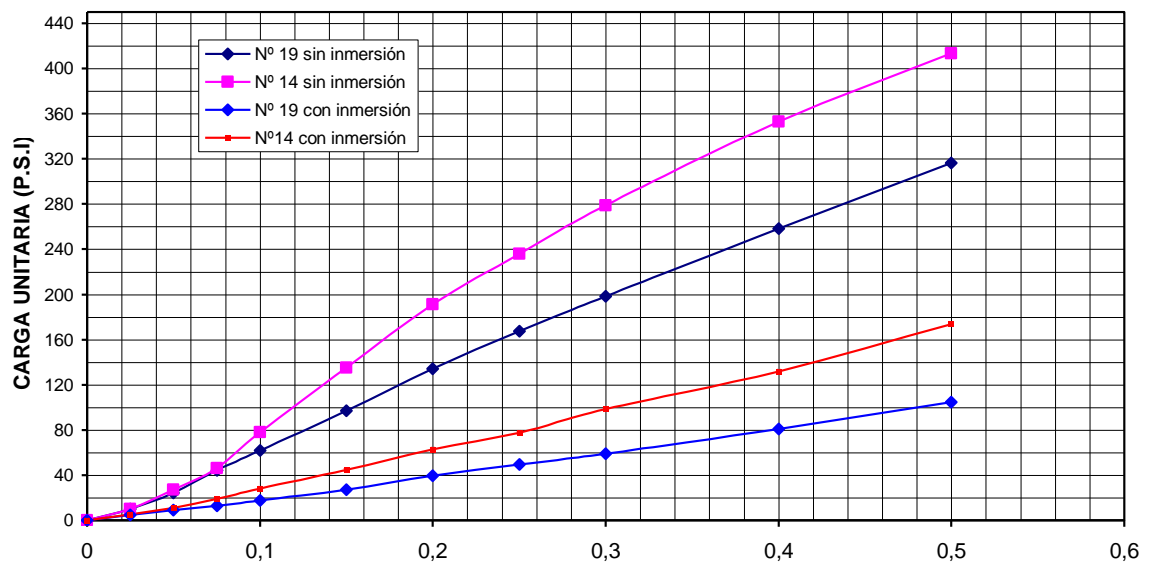


Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : suelo blanco. Muestra No.3

Fecha : Febrero - 2005

ENSAYO DE CBR												
Molde Nº	19			14			19			14		
Nº Golpes	26			26			26			26		
Días inmersión	0			0			2,5			2,5		
Expansión (Pg)							3,2			3,6		
<b>PENETRACION</b>	<b>LECT.</b>	<b>PRESION</b>	<b>CBR</b>	<b>LECT.</b>	<b>PRESION</b>	<b>CBR</b>	<b>LECT.</b>	<b>PRESION</b>	<b>CBR</b>	<b>LECT.</b>	<b>PRESION</b>	<b>CBR</b>
0,025 Pg.	15	10,2		15	10,2		7	4,8		8	5,44	
0,050 Pg.	36	24,5		40	27,2		13	8,8		16	10,88	
0,075 Pg.	65	44,2		68	46,2		19	12,9		28	19,04	
0,100 Pg.	91	61,9	7,0	115	78,2	10,2	26	17,7	1,8	41	27,88	3,0
0,150 Pg.	143	97,2		199	135,3		40	27,2		66	44,88	
0,200 Pg.	197	134,0	9,3	281	191,1	14,1	58	39,4	2,6	92	62,56	4,7
0,250 Pg.	246	167,3		347	236,0		73	49,6		114	77,52	
0,300 Pg.	292	198,6		410	278,8		87	59,2		145	98,6	
0,400 Pg.	380	258,4		519	352,9		119	80,9		198	134,64	
0,500 Pg.	465	316,2		608	413,4		154	104,7		255	173,4	
%W PENETRACION	23,5			23,7			29,5			25,7		



$$\text{CBR a } 0,1'' = \frac{\text{Carga unitaria leída a } 0,1}{1000}$$

$$\text{CBR a } 0,2'' = \frac{\text{Carga unitaria leída a } 0,2}{1500}$$

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro

**ANEXO D**  
**RESULTADOS DE LABORATORIO**  
**SUELO GRIS**





**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color gris. **Muestra Nº :** 4 **Fecha :** Noviembre de 2005

**ANALISIS GRANULOMETRICO - METODO DEL HIDROMETRO**

Hidrómetro Nº :	681169	Agente floculante :	Calgón.
Densidad de sólidos :	2,859	Cantidad floculante :	5 g.
Peso de sólidos :	55 g.	Corrección por floculante:	- 6
Corrección por menisco :	± 1		

Tiempo Transcurrido (min)	Temperatura °C	Lectura de Hidrometro (R')	Lectura Corregida (R' + cm) R	Profundidad efectiva (L)	Diametro de oartículas D (mm)	Ct	R - Cd ± Ct	Porcentaje más fino	
								Parcial	Total
1	21	41	42	10,5	0,04122	0,30	36,30	63,20	5,2
2	21	34	35	11,9	0,03103	0,30	29,30	51,01	4,2
5	21	27	28	13,2	0,02067	0,30	22,30	38,83	3,2
15	21	21	22	14,3	0,01242	0,30	16,30	28,38	2,3
30	2	18	19	14,9	0,00897	0,30	13,30	23,16	1,9
60	21,0	16	17	15,3	0,00642	0,30	11,30	19,67	1,6
120	21,0	14	15	15,7	0,00460	0,30	9,30	16,19	1,3
250	21,0	12,5	13,5	16,0	0,00322	0,30	7,80	13,58	1,1
1440	21,0	10	11	16,5	0,00136	0,30	5,30	9,23	0,8

**Observaciones :** \_\_\_\_\_

Victoria Eugenia Muñoz Valencia.  
Carlos Andrés Manrique Castro.



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Materiales, Suelos y pavimentos

**ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA**

**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

**Descripción :** Suelo color gris.

**Muestra N° :** 4 **Fecha :** Septiembre - 2004

ENSAYO N°	1	2	3	PROMEDIO	
Lectura del nivel de arena (Ls)	3,7	3,6	3,7		
Lectura del nivel de arcilla (Lc)	5,1	5,1	5,3		
Equivalente de arena = $\frac{Ls}{Lc} \times 100$	<b>73</b>	<b>71</b>	<b>70</b>	<b>72</b>	
Condiciones de la arena para el ensayo:					
Humeda	<input type="checkbox"/>	Seca al aire	<input checked="" type="checkbox"/>	Seca al horno	<input type="checkbox"/>

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
Carlos Andrés Mnrique Castro



**Obra :** Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
**Descripción :** Suelo color gris.  
**Muestra N° :** 4 **Fecha :** Septiembre de 2004

**PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SUELOS FINOS**

PRUEBA	1	2	3	4
Temperatura (°C)	21,7	21,8		
Matraz N°	1	10		
Wf <sub>w</sub> (g.)	650,64	663,40		
Wf <sub>sw</sub> (g.)	691,30	706,91		
Ws (g.)	62,55	66,87		
K	0,9996	0,9996		
Ws + Wf <sub>w</sub> - Wf <sub>sw</sub> (g.)	21,89	23,36		
S <sub>s</sub> * G	2,856	2,861		

Wf<sub>w</sub> : peso matraz + agua a temperatura °C hasta nivel de enrase. (curva de calibración).  
 Wf<sub>sw</sub> : peso matraz + agua + suelo.  
 Ws : peso suelo seco.  
 Ws + Wf<sub>w</sub> - Wf<sub>sw</sub> = volumen desalojado.  
 S = peso especifico relativo de los sólidos.

$$S = \frac{Ws * K}{Ws + Wf_w - Wf_{sw}}$$

T (°C)	D <sub>R</sub>	K
18	0,9986244	1,0004
19	0,9984347	1,0002
20	0,9982343	1,0000
21	0,9980233	0,9998
22	0,9978018	0,9996
23	0,9975702	0,9993
24	0,9973286	0,9991
25	0,9970770	0,9989
26	0,9968156	0,9986
27	0,9965451	0,9983
28	0,9962652	0,9980
29	0,9959761	0,9977
30	0,9956780	0,9974

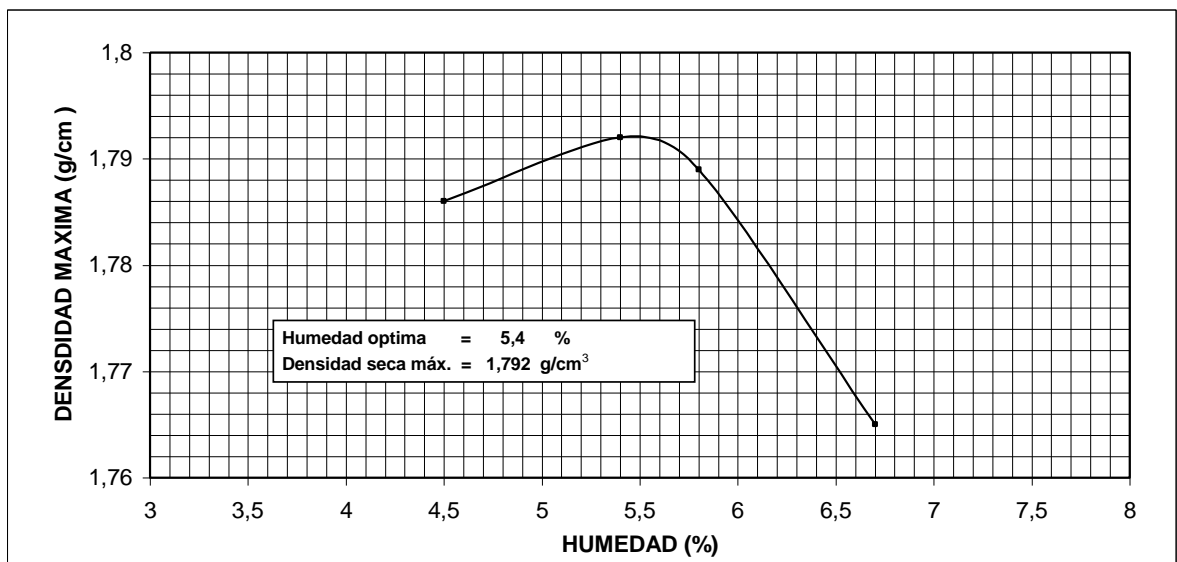
Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



**ENSAYO DE COMPACTACION**

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.  
 Descripción : Suelo color gris. Muestra Nº : 4  
 Método : Harvard miniatura Fecha : 15 - 10 - 2004

Prueba Nº		1	2	3	
Nº de golpes		25	25	25	
Humedad deseada (%)		7,0	8,0	9,0	
Humedad inicial de la muestra (%)		3,0	3,0	3,0	
Humedad adicional (%)		4,0	5,0	6,0	
Peso muestra húmeda (g.)		150,0	150,0	150,0	
Peso muestra seca (g.)		145,6	145,6	145,6	
Agua adicional (cm <sup>3</sup> )		5,8	7,3	8,7	
Molde Nº		1	1	1	
Peso muestra húmeda más molde (g.)		245,57	247,19	246,64	
Peso molde (g.)		131,74	131,74	131,74	
Peso muestra húmeda (g.)		113,83	115,45	114,9	
Humedad de horno (%)		4,5	5,8	6,7	
Peso muestra seca (g.)		108,93	109,12	107,69	
Volumen del molde (cm)		61,0	61,0	61,0	
Densidad muestra seca (g/cm <sup>3</sup> )		1,786	1,789	1,765	
C	Expansión primer día. 0,001"				
	Expansión segundo día. 0,001"				
B	Expansión tercer día. 0,001"				
R	Expansión cuarto día. 0,001"				
	Expansión (%)				



Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
 Carlos Andrés Manrique Castro



Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Civil  
Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos

Obra : Tesis de grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Descripción : Suelo color gris.

Muestra N° : 4

Fecha : Octubre de 2004

### SENSIBILIDAD AL AGUA - EXPANSION

No. de golpes	25	25
Humedad deseada. %	5,4	5,4
Humedad inicial de la muestra. %	1,8	1,8
Humedad adicional. %	3,6	3,6
Peso muestra húmeda. Gr	150,0	150,0
Peso muestra seca. Gr	147,3	147,3
Agua adicional. Cc	5,3	5,3
Molde No.	1	2
Peso muestra húmeda más molde. Gr.	245,92	291,43
Peso molde. Gr.	131,36	178,7
Peso muestra húmeda. Gr.	114,56	112,73
Húmedad de horno. %	5,4	5,4
Peso muestra seca. Gr	108,7	107,0
Volumen del molde. Cc	60,5	60,5
Densidad muestra seca. Gr/cc	1,797	1,768
Penetración inicial antes inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	>4,5	>4,5
Penetración final despues inmersión Kg/cm <sup>2</sup>	3,5	3,0

Resultados expansión (0.001")		
Tiempo min.	Molde No. 1	Molde No. 2
1	1,0	1,0
2	1,0	1,0
3	0,0	2,0
5	0,0	2,0
10	0,0	2,0
15	0,0	2,0
20	0,0	2,0
30	0,0	2,0
60	0,0	2,0
180	0,0	2,0
1260	0,0	2,0
2700	0,0	2,0
%expansión	0,0	0,07

Victoria Eugenia Muñoz Valencia  
Carlos Andrés Manrique Castro



**ANEXO E**  
**RESULTADOS DE LABORATORIO**  
**AZUL DE METILENO**

<b>ROJIZO</b>					
<b>SECO AL AIRE SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	4,8	1,29	5,0	1,24
PASA Nº 200	0,05	4,0	1,51	4,2	1,44
% W PASA Nº 40 = 24,1			% W PASA Nº 200 = 20,6		
<b>SECO AL AIRE CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	4	1,55	4,0	1,55
PASA Nº 200	0,05	4,7	1,28	4,7	1,28
% W PASA Nº 40 = 24,1			% W PASA Nº 200 = 20,6		
<b>SECO AL HORNO SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	3,5	1,43	3,7	1,35
PASA Nº 200	0,05	3,5	1,43	3,7	1,35
PASA Nº 325	0,05	2,0	2,50	2,1	2,38
<b>SECO AL HORNO CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	4,0	1,25	4,0	1,25
PASA Nº 200	0,05	3,5	1,43	3,7	1,35

<b>HABANO</b>					
<b>SECO AL AIRE SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	3,5	1,48	3,5	1,48
PASA Nº 200	0,05	3,7	1,40	3,7	1,40
% W PASA Nº 40 = 3,7			% W PASA Nº 200 = 3,5		
<b>SECO AL AIRE CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	3,0	1,73	3,0	1,73
PASA Nº 200	0,05	4,0	1,30	4,0	1,30
% W PASA Nº 40 = 3,7			% W PASA Nº 200 = 3,5		
<b>SECO AL HORNO SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	4,0	1,25	4,5	1,11
PASA Nº 200	0,05	3,6	1,38	4,1	1,22
PASA Nº 325	0,05	2,1	2,38	2,1	2,38
<b>SECO AL HORNO CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	3,5	1,43	3,7	1,56
PASA Nº 200	0,05	3,2	1,56	3,6	1,39

<b>BLANCO</b>					
<b>SECO AL AIRE SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	8,0	0,63	8,5	0,60
PASA Nº 200	0,05	7,0	0,72	8,0	0,63
% W PASA Nº 40 = 1,6			% W PASA Nº 200 = 1,4		
<b>SECO AL AIRE CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	7,0	0,73	7,2	0,71
PASA Nº 200	0,05	7,2	0,70	7,0	0,73
% W PASA Nº 40 = 1,6			% W PASA Nº 200 = 1,4		
<b>SECO AL HORNO SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	7,5	0,67	8,0	0,63
PASA Nº 200	0,05	7,8	0,64	7,6	0,66
PASA Nº 325	0,05	6,7	0,75	6,8	0,73
<b>SECO AL HORNO CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,05	6,8	0,74	7,0	0,71
PASA Nº 200	0,05	6,9	0,73	6,8	0,73

<b>GRIS</b>					
<b>SECO AL AIRE SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,02	3,2	0,63	3,6	0,56
PASA Nº 200	0,02	3,4	0,61	3,4	0,61
% W PASA Nº 40 = 1,4			% W PASA Nº 200 = 2,2		
<b>SECO AL AIRE CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,02	9,2	0,22	9,2	0,22
PASA Nº 200	0,02	3,2	0,63	3,2	0,63
% W PASA Nº 40 = 1,4			% W PASA Nº 200 = 2,2		
<b>SECO AL HORNO SIN INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,02	6,7	0,30	6,7	0,3
PASA Nº 200	0,02	4,4	0,46	4,4	0,46
PASA Nº 325	0,02	2,5	0,80	2,2	0,91
<b>SECO AL HORNO CON INMERSION</b>					
<b>FRACCION</b>	<b>AZUL (g.)</b>	<b>SUELO ENSAYO 1 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 1 (%)</b>	<b>SUELO ENSAYO 2 (g.)</b>	<b>VALOR DE AZUL - 2 (%)</b>
PASA Nº 40	0,02	7,4	0,27	7,4	0,27
PASA Nº 200	0,02	3,5	0,57	3,5	0,57

**ANEXO F**  
**ESPECIFICACION INVIAS**

**ANEXO G**

**NORMA I.N.V. E-235**

**ANEXO H**  
**NORMA NLT-171/90**



