

ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS MEDIANTE POLÍMEROS ACRÍLICOS



DIEGO FELIPE TORRES VALENCIA

**Director:
ILUCIANO RIVERA
Ingeniero Civil
Msc en Geotecnia**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
2007**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1 OBJETIVOS.....	2
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
2 JUSTIFICACION.....	3
3 MARCO TEORICO	4
3.1 GENERALIDADES	4
3.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS ARCILLOSOS	5
3.3 METODOS DE ESTABILIZACION	12
4 METODOLOGIA	18
4.1 MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN	20
4.1.1 Localización y descripción de los suelos.	20
4.1.2 Caracterización de los suelos.	21
4.2 MATERIALES ESTABILIZANTES (POLÍMEROS).	37
5 ANALISIS DEL EFECTO DEL CURADO AL AIRE PARA EL ESTABILIZANTE EN LOS SUELOS.....	49
5.1 Generalidades.	49
5.2 Determinación del aporte de humedad del polímero para las diferentes variaciones de aditivo en la mezcla.	49
5.3 Determinación de la resistencia de los suelos.	50
CONCLUSIONES.....	65
GLOSARIO.....	69
BIBLIOGRAFIA.....	70
ANEXOS.....	72

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS FINOS	20
TABLA 2. HUMEDADES NATURALES DE LOS SUELOS.....	21
TABLA 3. LÍMITES DE ATTERBERG.	23
TABLA 4. HUMEDADES ÓPTIMAS Y DENSIDADES MÁXIMAS.....	23
TABLA 5. RESISTENCIA NATURAL DE LOS SUELOS.....	24
TABLA 6. DATOS DE PH PARA LAS MUESTRAS DE SUELO.	26
TABLA 7. DATOS DE PH PARA LAS MUESTRA DE SUELO. (CORRESPONDENCIA).....	26
TABLA 8. DATOS DE CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO HALLADOS PARA LAS MUESTRAS DE SUELO	27
TABLA 9. INTERCAMBIO CATIONICO PARA LAS MUESTRAS DE SUELO. (CORRESPONDENCIA).....	28
TABLA 10. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE LOS MINERALES ARCILLOSOS.	28
TABLA 11. RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS MUESTRAS DE SUELO EN LA PRUEBA DE CARBONATOS.	29
TABLA 12. RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS MUESTRAS DE SUELO EN LA PRUEBA DE CARBONATOS. (CORRESPONDENCIA).....	29
TABLA 13. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA PRUEBA DE GRUMO.....	30
TABLA 14. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DEL GRUMO. (CORRESPONDENCIA)	30
TABLA 15. DETERMINACIÓN DE SULFATOS, SILICATOS, ALÚMINA Y ÓXIDO DE HIERRO.....	31
TABLA 16. DETERMINACIÓN DE SULFATOS, SILICATOS, ALÚMINA Y ÓXIDO DE HIERRO. (CORRESPONDENCIA).....	31
TABLA 17. CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS SUELOS.....	32

TABLA 18. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS SUELOS. (CORRESPONDENCIA)	32
TABLA 19. RESUMEN DE LOS RESULTADO OBTENIDOS PARA LOS DOS TIPOS DE SUELO.....	36
TABLA 20. ENERGÍA REQUERIDA PARA ROMPER CADA ENLACE.	42
TABLA 21. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL POLÍMERO (<i>TEXILÁN – 553</i>)	44
TABLA 22. RESISTENCIAS Y DEFORMACIÓN UNITARIA DE LOS SUELOS (REFERENCIA).	51
TABLA 23. EJEMPLO DE HUMEDAD DE HORNO PARA BRIQUETAS CON 2% DE POLÍMERO.....	54
TABLA 24. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE INCONFINADA PARA LA BRIQUETA CON 2 % POLÍMERO (SUELO ROSADO #1)	54
TABLA 25. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (2% POLÍMERO)	55
TABLA 26. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (3% POLÍMERO)	56
TABLA 27. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (4% POLÍMERO)	57
TABLA 28. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (5% POLÍMERO)	58
TABLA 29. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (6% POLÍMERO)	59
TABLA 30. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (7% POLÍMERO)	60
TABLA 31. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (8% POLÍMERO)	61
TABLA 32. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (9% POLÍMERO)	62
TABLA 33. RESISTENCIAS DEL SUELO-ESTABILIZANTE (10% POLÍMERO)	63

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MICROESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS.....	5
FIGURA 2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS ARCILLAS.....	10
FIGURA 3. PRESENCIA DE AGUA EN LAS PARTÍCULAS.	11
FIGURA 6. CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE. SUELO ROSADO #1.....	24
FIGURA 7. CARTA DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE. SUELO AMARILLO #2.....	25
FIGURA 8. CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN (SUELO ROSADO #1 – POLÍMERO 2%)	54

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. HUMEDADES DE HORNO PARA LOS SUELOS	73
ANEXO 2. TENDENCIA DE LA RESISTENCIA RESPECTO DE LAS VARIACIONES DE POLÍMERO. SUELO ROSADO #1.	74
ANEXO 3. TENDENCIA DE LA RESISTENCIA RESPECTO DE LAS VARIACIONES DE POLÍMERO. SUELO AMARILLO #2.	75
ANEXO 4. TENDENCIA DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FALLA RESPECTO DE LAS VARIACIONES DE POLÍMERO. SUELO ROSADO #1.	76
ANEXO 5. TENDENCIA DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FALLA RESPECTO DE LAS VARIACIONES DE POLÍMERO. SUELO AMARILLO #2.	77
ANEXO 6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE INCONFINADA	78

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de vías con volúmenes bajos de tránsito, requiere frecuentemente que se diseñen estructuras de pavimento, con agregados de baja calidad. Esta necesidad en ocasiones, está limitada por la disponibilidad de buenos materiales, por las distancias de acarreo y hasta por consideraciones económicas.

Las propiedades ingenieriles indeseadas en los agregados que llevan a pensar en **materiales de mala calidad**, son básicamente; baja capacidad de soporte, susceptibilidad alta a la humedad o potenciales expansivos que represente peligro para la estructura del pavimento.

Cuando se agotan las posibilidades de encontrar la solución más adecuada, pronta y económicamente factible, se recurre a intentar mejorar las propiedades de los suelos y agregados de mala calidad, por medio de la **estabilización de suelos**. Los métodos de estabilización tradicional incluyen la aplicación de combinaciones variadas de limo, cemento, escorias de alto horno y materiales bituminosos. Estas técnicas de estabilización requieren tiempos de curado prolongados y relativamente grandes cantidades de aditivos, que representan un incremento considerable de los costos. Otro tipo de problema se presenta cuando los productos que contienen calcio como el cemento, cal viva, cenizas de alto horno; desarrollan reacciones químicas adversas en suelos con contenido de sulfatos. Este hecho, ha llevado a la industria y a entidades investigadoras a buscar alternativas de estabilización con materiales no convencionales.

Hacen parte de éstos materiales no convencionales, algunos polímeros de origen sintético que gracias a la investigación y el desarrollo de procesos industriales, han demostrado su eficacia en diferentes campos de la ingeniería. Se puede citar por ejemplo, las ventajas de trabajar con polímeros que mejoran condiciones de curado o resistencia a la abrasión en morteros o en concretos.

El objeto del presente trabajo es, hacer un pequeño aporte en la dirección que se han trazado investigaciones anteriores, con el fin de comprender la susceptibilidad de los suelos a estabilizaciones de tipo **no convencional**; particularmente de la estabilización con polímeros. Limitando el estudio, a las condiciones establecidas dentro de la investigación (obtención de muestras, tipo de polímero empleado, condiciones de curado, etc.)

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de un estabilizante no convencional (un copolímero acrílico estirenado, de nombre comercial *Texilán-553*), bajo condiciones de curado al aire; en busca de mejorar las propiedades mecánicas de suelos finos con alto contenido de arcillas.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a. Determinar las propiedades físicas de los suelos a estudiar.
- b. Hacer una comprobación del aporte de agua del polímero en el momento de humectación de los suelos, cuando se busca alcanzar los niveles de humedad óptima.
- c. Identificar las proporciones óptimas de humedad y de cantidad de polímero en el proceso de estabilización.
- d. Determinar la tendencia de la resistencia mecánica de los suelos, en relación a los incrementos de polímero, para las muestras elaboradas.
- e. Estudiar el efecto del aditivo, de acuerdo a la plasticidad que presente cada uno de los suelos.
- f. Comparar los resultados obtenidos con los de las investigaciones similares realizadas anteriormente.

2 JUSTIFICACION

Las deficiencias evidentes que se presentan en la infraestructura del país, hacen necesario que se apunten los esfuerzos hacia la construcción y recuperación de la malla vial. De diferentes maneras se ha comprobado como alrededor de las vías es desde donde se acelera el crecimiento de las naciones. La precaria situación económica, limita ese proceso de desarrollo. Por eso, en el momento de encontrar las soluciones más adecuadas y más económicas dentro de los procesos de diseño y construcción, se encuentra en la estabilización de suelos una de las principales actividades, factibles de ser consideradas.

Al contar con una subrasante debidamente estabilizada; es decir, con las condiciones de capacidad de carga, susceptibilidad a la humedad y expansión; es posible diseñar estructuras que soporten adecuadamente los estratos encargados de brindar la resistencia y la funcionalidad de la estructura.

Los materiales utilizados para las estabilizaciones convencionales de suelo, tienen el inconveniente de no ser muy económicos, en ocasiones necesitan de largos periodos de curado o se requieren de grandes cantidades para que sean verdaderamente efectivos. Esto ha llevado a que las investigaciones busquen alternativas de estabilización con sustancias estabilizantes que sean de bajo costo, como los materiales sintéticos o aquellos que sean el producto del desperdicio de procesos industriales.

La industria ofrece productos sintéticos que pueden representar soluciones óptimas, pero que por su propia naturaleza y por las propiedades intrínsecas de los suelos, resultan ser específicos para cada tipo de suelo o condiciones ambientales particulares. Los polímeros se presentan como una solución económica al problema de la estabilización de suelos arcillosos; si se tiene en cuenta que actualmente son utilizados de diversas formas en la construcción.

También es importante recordar que la degradación ambiental de los suelos debido a las grandes remociones, es un problema que en Colombia representa cerca del 24% del total de degradación de suelos. Por eso es necesario, explorar desde ahora las nuevas posibilidades que ofrecen las estabilizaciones no convencionales.

3 MARCO TEORICO

3.1 GENERALIDADES

Los suelos son uno de los materiales más importantes, durante el proceso de construcción de obras civiles, pero sus condiciones naturales en ocasiones no son las más adecuadas para que las obras se ejecuten garantizando calidad y durabilidad. Esta calidad va, como se menciona anteriormente, ligada a las propiedades de los suelos.

Uno de los tipos de suelos más complicados de manejar son aquellos con contenidos arcillosos, los cuales representan un gran porcentaje (se conoce que a nivel mundial, aproximadamente el 21% de los suelos contienen arcillas de baja plasticidad y un 10% arcillas de alta plasticidad).

El afán constante de los ingenieros en el momento de sortear tales inconvenientes, los ha llevado a probar con diferentes métodos para la estabilización de suelos. En ocasiones se opta por cambiar el área de ubicación de la estructura o el reemplazo total o parcial del material no deseado; otra posibilidad consiste en permitir el drenaje del suelo antes de la construcción o incluso el mejoramiento de la granulometría mediante suelos de mejor calidad; afectándose con esto, los costos finales del diseño, por ser soluciones que castigan el presupuesto de forma desfavorable. De aquí la importancia de los métodos de estabilización, pues se convierten en una opción acertada, considerando una relación costo-beneficio; si se recuerda que es posible alcanzar incrementos de resistencia hasta del 1700% con la adición de un 8% de cal (relación a peso seco) e incrementos de hasta 1000% con la adición de cemento.

La estabilización de suelos se entiende entonces, como el tratamiento que se le puede dar a los suelos con el fin de mejorar alguna o algunas propiedades físicas y/o mecánicas. Comprende métodos como la compactación mecánica o la utilización de productos, que mediante procesos físicos o químicos; alteren su estructura.

3.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

3.2.1 Estructura de los suelos arcillosos. Las pequeñas partículas de arena y limo, son parte de una roca madre o pequeños cristales minerales.

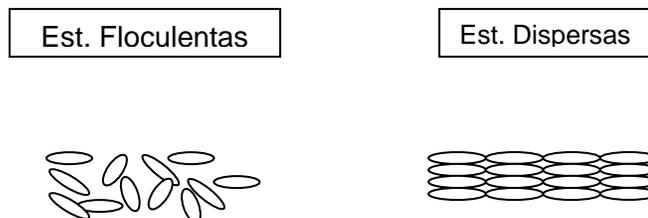
La estructura mineral de las arcillas está tipificada como octa o tetraedrales, unidas entre ellas como una estructura entramada. Si la estructura básica es sílice, se forma una unidad tetraédrica en la que en los extremos, presenta moléculas de oxígeno (O^{2-}) sin compensar. Si por el contrario, la estructura básica es el aluminio (gibbsite) o el magnesio (brucita), la unidad adquiere una forma tetraédrica, presentando en los extremos moléculas de hidróxidos (OH^-).

La trama de la estructura molecular de las arcillas es tal, que muestra una carga eléctrica sobre la superficie de las partículas. La carga puede ser predominantemente aniónica ($-$) sobre la superficie lisa y catiónica ($+$) sobre los bordes.

Es importante también advertir, que la estructura de las arcillas debe considerar los niveles de macroestructura y microestructura. A niveles macro, se deben estudiar aspectos como la forma de las grietas, fisuras y formación de lentes; presentes en los depósitos.

A nivel micro, interesa la forma de la orientación de las partículas en los depósitos naturales. Se habla de una forma **floculenta** en ambientes floculantes como por ejemplo las aguas marinas, en este caso, las partículas se encuentran agrupadas de forma desordenada; característica ésta que hace que los suelos presenten altos contenidos de humedad y alto porcentaje de vacíos. En los depósitos encontrados con forma **dispersa** (partículas orientadas), generalmente se trata de ambientes sin floculantes como las aguas dulces, estos depósitos presentan suelos con bajos porcentajes de humedad y relaciones de vacío bajas.

Figura 1. Microestructura de las arcillas.



Hoy en día, también se considera la estructura interna del suelo; de forma simplificada, teniendo en cuenta tres tipos de elementos que son: *partículas elementales, agregados de partículas, y poros*. A partir de estos elementos se pueden establecer tres estructuras fundamentales que simplifican el conjunto de todas las estructuras posibles.

Cuando las partículas elementales están distribuidas de forma homogénea se considera una estructura de tipo matricial, con granos de arena rodeados de partículas arcillosas elementales creando una matriz (*Microestructura matricial*).

A veces, las partículas elementales están agrupadas como si fueran un grano de tamaño mayor. En este caso se dice que hay una microestructura de agregados (*Microestructura de agregados de partículas*).

Finalmente puede considerarse una estructura de granos de arena con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos, sin partículas de arcilla (*Microestructura con matriz de arena y conectores de arcilla*).

Generalmente los suelos compactados del lado húmedo de compactación, y los suelos expansivos se corresponden con una microestructura de tipo predominantemente matricial. Mientras que los suelos compactados del lado seco del óptimo, o que tienen tendencia a colapsar, suelen presentar microestructura de agregados, o con conectores de arcilla. Cuando se carga un suelo con una microestructura de agregados, los contactos entre agregados o entre granos de arena, y agregados se rompen de modo que los agregados pasan a ocupar el vacío de los poros, y el suelo colapsa irreversiblemente.

3.2.2 Propiedades electrostáticas (Cohesión y plasticidad). La molécula de agua es BIPOLAR, por ejemplo, tiene el oxígeno en un extremo y el hidrógeno al otro extremo de la molécula. Hay una carga neta (-) en un extremo y una carga (+) al otro extremo. Es ésta característica de la molécula de agua, la cual, débilmente atrae una molécula a otra, la llamada tensión superficial. El agua, que es un conductor natural, es electrostáticamente atraída a la superficie de las partículas de arcilla. De hecho, las partículas de arcilla son rodeadas por una capa de agua, rodeando electrostáticamente la arcilla. Esta capa es llamada "**DOBLE CAPA DIFUSA**", porque las moléculas de agua y los cationes cercanos a la superficie de la partícula de arcilla, están fuertemente rodeadas, mientras las moléculas de agua en la parte exterior de la frontera electrostática de agua, está débilmente sujeta.

Es ésta afinidad (atracción), entre el agua y la arcilla; la que le da a la arcilla las propiedades de cohesión y plasticidad; propiedades éstas que no poseen por sí mismas las arenas o limos. La arcilla es por consiguiente, esencial en todas las gravas, debido a que su plasticidad (de naturaleza plástica cuando está húmeda), permite que las vías sean afirmadas y compactadas; ésta cohesión liga todas las rocas, arenas y limos de forma integral.

3.2.3 Propiedades mecánicas. Como la mayoría de los materiales en la naturaleza, los suelos están sometidos a esfuerzos de compresión, tracción o tensión y esfuerzos cortantes; la falla del material se produce cuando la combinación de diferentes esfuerzos, supera las capacidades de soporte del suelo.

La resistencia de los suelos finos como limos y arcillas esta directamente relacionada con su contenido de humedad, siendo esta considerablemente más baja cuando presentan un mayor contenido de agua. Para algunos tipos de suelo y obras de ingeniería, a veces resulta más importante que la resistencia, la baja deformabilidad bajo la acción de las cargas, como en el caso de los suelos resilientes.

El comportamiento de la resistencia de los diferentes tipos de suelo es muy variable y depende del tipo de suelo, la composición mineralógica, la forma y tamaño de las partículas, su contenido de humedad (para suelos finos), su historial de esfuerzos, el grado de compactación, la presión de confinamiento, etc.

La resistencia del suelo debe ser determinada teniendo en cuenta las condiciones de trabajo y la manera como se va a utilizar el mismo, empleando para tal efecto métodos que representen de una manera veraz los diferentes parámetros que puedan afectar el material, buscando siempre que exista similitud entre las condiciones representadas en laboratorio y las que el suelo va a presentar una vez se encuentra en sitio.

Además, puede ser incrementada de diversas formas como variando su contenido de humedad, incrementando su grado de compactación, adicionando agentes estabilizantes, colocando precargas temporales para aumentar la compacidad, etc.

En ocasiones, es difícil incrementar la resistencia de un suelo con métodos de estabilización tradicional, como en el caso de aquellos que tienen un alto contenido de materia orgánica (del orden del 10% y superior) ya que ésta inhibe la acción de los agentes estabilizantes. Por esta razón, para la adición de agentes estabilizantes es necesario conocer las características físico-químicas del suelo y su composición mineralógica.

3.2.4 Expansión. Las partículas arcillosas o “*capas de silicatos*”, son estructuras con enormes áreas superficiales por cada gramo. En éste tipo de estructuras, adquieren enorme importancia las fuerzas intersticiales, las cuales dependen, entre otros aspectos, del contenido de agua. Si se combinan la acción de gran área superficial de las arcillas con la atracción electrostática del agua, se producen enormes fuerzas de hasta más de 10000 atmósferas de presión. La magnitud de esta fuerza expansiva, es la que se debe controlar mediante los métodos de estabilización.

Pero es la acción del agua; o más precisamente, la interacción del agua con partículas arcillosas, la desencadenante de éste fenómeno. Los ciclos de humedecimiento y secado, producidos por la adversidad del clima; ocasionan el agrietamiento de las estructuras de pavimento.

Los métodos de estabilización, esperan entonces; crear ambientes altamente catiónicos, para evitar que las partículas disminuyan la tendencia de atraer y retener agua.

3.2.5 Permeabilidad. Se conoce como la capacidad que tienen los suelos para permitir el paso de agua a través de sus vacíos. Esta propiedad es importante para la solución de problemas como la disipación de la presión de poros y el paso de agua a través del suelo (problemas que afectan el comportamiento de la masa de suelo).

La permeabilidad, se relaciona directamente con el grado de compactación del mismo; una baja compactación en suelos arcillosos con humedades bajas, permite la formación de enormes vacíos intersticiales. Una alta humedad de compactación, disminuye la permeabilidad, pues las partículas de arcilla se orientan mejor permitiendo que el volumen de vacíos disminuya.

3.2.6 Durabilidad. Se conoce como la susceptibilidad de los suelos a factores del medio ambiente como la erosión y la abrasión. Tiene gran valor dentro de la ingeniería de suelos. La durabilidad se puede ver afectada por factores como el nivel freático, la exposición a climas agrestes, el espesor y la estructura de los perfiles estratigráficos que los contienen, etc.

La baja durabilidad de las diferentes capas de la estructura de pavimento tiene altas repercusiones en los costos de mantenimiento de las vías. Es posible que se controle la durabilidad de los suelos mediante métodos de estabilización, pero cuando se presentan deficiencias, éstas se deben generalmente a una mala aplicación o la utilización de cantidades inadecuadas. Lo ideal es, proteger las capas superficiales evitando disgregaciones de material y erosiones producidas en las capas internas debido a una alta permeabilidad.

3.2.7 Compresibilidad. La compresibilidad es una propiedad directamente ligada al término consolidación. Los factores que la afectan, dependen del historial de cargas, del tipo de sobrecarga que se aplica al suelo y a las características del líquido intersticial de las partículas. La importancia de ésta propiedad se refleja en las posibilidades de cambios volumétricos en la masa de suelos, afectándose así los esfuerzos adicionales que se puedan generar en las estructuras.

Los cambios volumétricos que en ocasiones se presentan en los suelos, modifican otras propiedades como la permeabilidad, resistencia al esfuerzo cortante y provocan deformaciones. Por ejemplo, en arcillas saturadas sin posibilidad de drenaje, en el momento en que se permita éste último, se generan esfuerzos que son transmitidos gradualmente a la estructura.

La estabilización de ésta propiedad, apunta en la modificación de los procesos de compactación, de drenaje o la adición de productos estabilizantes.

3.2.8 Resiliencia. Se conoce como la capacidad de recuperación que el suelo presenta, pero en términos prolongados de tiempo (deformaciones a largo plazo). No es una condición elástica y se presenta generalmente en suelos limosos, se manifiesta con la aparición de grietas.

Es difícil encontrar una estabilización que se relacione directamente con éste propiedad.

3.2.9 Manejabilidad. Su término es lo suficientemente claro por sí solo, ésta propiedad es muy apreciada en la ingeniería. Facilita procesos como la compactación, el moldeado, el transporte y la excavación. Existen métodos que facilitan la manejabilidad de los suelos, entre ellos el más popular; el humedecimiento del suelo para la obtención de humedades óptimas.

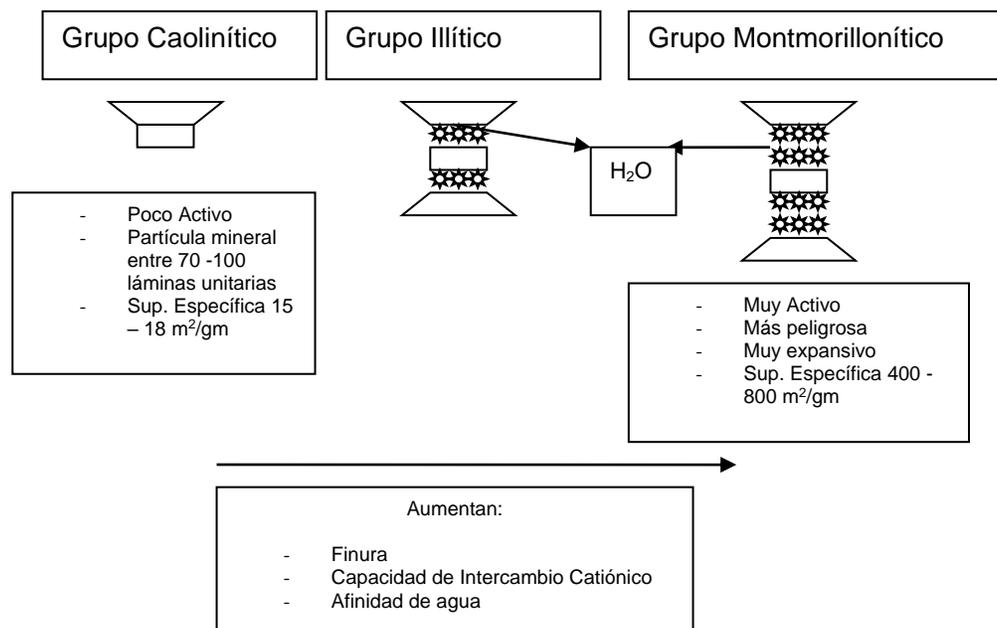
3.2.10 Composición mineralógica. Se consideran estructuras arcillosas aquellas donde están presentes minerales arcillosos con diámetros menores a 2μ . Para este tipo de estructuras adquieren importancia las fuerzas interparticulares, las cuales dependen entre otros aspectos del contenido de agua. Por lo general se trata de silicatos hidratados de aluminio, magnesio y a veces hierro.

Los minerales arcillosos se pueden agrupar en:

- Grupo Caolinítico (Lámina doble – Enlace Fuerte – más estable).
- Grupo Illítico (Lámina triple – Enlace débil).
- Grupo Montmorillonítico (Lámina triple – Enlace muy débil – muy activo).

Se pueden resumir sus propiedades en la Figura 2, de la siguiente manera:

Figura 2. Composición Mineralógica de las arcillas.



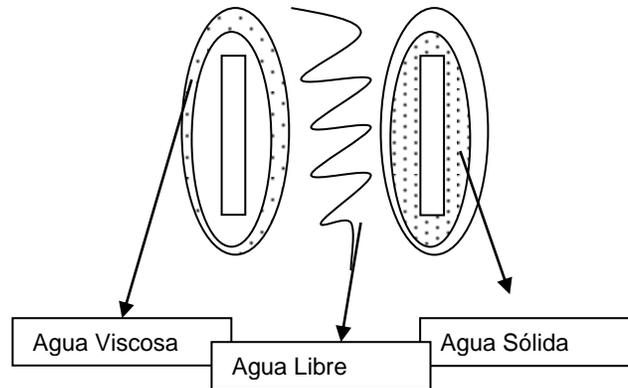
Las cargas eléctricas negativas libres son las responsables de:

Agua adherida o adsorbida (unida eléctricamente). (Ver Figura 3).

Algunas características del agua adsorbida son:

- Consistencia sólida o viscosa
- Se pierde en secado con temperatura mayor a 60°C
- Es responsable en parte de la plasticidad
- Es responsable en parte de la baja permeabilidad

Figura 3. Presencia de agua en las partículas.



Presencia de cationes de intercambio (teniendo en cuenta que en el agua intersticial hay sales disueltas); que pueden ser sustituidos (lavados), los de mayor valencia sustituyen a los de menor valencia (mayor valencia: suelos más estables).

La mayoría de fallas en las vías, está asociada con la acción del agua (algunas veces la ausencia de agua); o más precisamente, en la interacción entre el agua y las partículas de arcilla en la vía. Ciclos de humedecimiento y secado, pueden provocar que la vía se agriete a través de la expansión y contracción de la arcilla. Un contenido alto de humedad, puede hacer que gravas con alto contenido de arcillas muy plásticas y blandas, se vuelvan muy lodosas en climas húmedos y lluviosos.

De otro lado; vías de grava con insuficiente arcilla o pobremente compactadas, pierden cohesión, al igual que polvo; y pueden llegar a ondularse en temporadas secas (similar al secado de la arena en la playa comparado con la arena húmeda).

3.3 METODOS DE ESTABILIZACION

La estabilización de suelos en la ingeniería práctica, particularmente en las vías terrestres; ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos.

Algunas de las técnicas más utilizadas se describen a continuación:

3.3.1 Estabilización mecánica. Se entiende como la modificación de algunas de las propiedades de los suelos, mediante la utilización de medios mecánicos. Tales como la compactación, la aplicación de precargas y el drenaje.

Estabilización física. Consiste en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo. Consiste en el mejoramiento de las granulometrías por mezclado o la utilización de materiales que brinden resistencia estructural como las fibras geotextiles, en donde se aprovechan las capacidades de resistencia de materiales como las mallas sintéticas u otros materiales no convencionales.

3.3.2 Estabilización físico-química. Aprovecha las bondades de la estabilización física, pero además incorpora la utilización de sustancias que mediante procesos químicos, aceleren el acondicionamiento de los suelos. Ejemplo de este tipo de estabilización es la utilización de materiales cementantes como la cal, el yeso o el cemento Pórtland. Este tipo de métodos acelera procesos como los de absorción o evaporación, aumento o disminución del intercambio catiónico, etc.

3.3.3 Estabilización electroquímica. La estabilización electromecánica, es un tipo de tratamiento que se le da a los suelos para reducir el potencial expansivo de materiales arcillosos y prevenir el daño de las estructuras. Consiste en inyectar una solución estabilizadora que reduce la capacidad de las partículas para atraer y retener agua.

Para estructuras nuevas, la estabilización se puede realizar después de que el movimiento de tierras se ha completado y el área se ha compactado a nivel de la rasante. La profundidad de inyección se determina de acuerdo a las condiciones del suelo y requerimientos del proyecto.

La estabilización electroquímica, crea un ambiente rico en cationes en la zona tratada. Las partículas individuales de arcilla (-) se reducen, al igual que su tendencia a retener agua. Se presenta de ésta manera, una expansión mínima después del tratamiento.

Su principal cualidad es la capacidad de estabilizar materiales expansivos *in situ*. Además de ser efectivo para tratar suelos expansivos bajo estructuras existentes. Su efectividad está comprobada hasta 2.5 mts de profundidad

Su implementación es relativamente menos costosa que la de otros métodos convencionales, debido a su habilidad de estabilizar el material expansivo en el lugar. Otro tipo de métodos es más costoso, además de ser intrusivos. Una desventaja, es la de necesitar de equipo especializado para la inyección de la ***solución estabilizadora***. Una ventaja, puede entregar rendimientos de 3000 metros cuadrados por día, a una profundidad de 2.5 mts.

3.3.4 Estabilización con polímeros. Consiste en tratar los suelos con sustancias orgánicas o sintéticas llamadas polímeros.

Los polímeros son cuerpos que constan de elementos de la misma especie y en la misma proporción que las resinas pero en un número tal que las moléculas de unos son múltiplos del otro, siendo sus pesos también múltiplos; entre los monómeros más conocidos tenemos el etino (C_2H_2), el butanotrieno (C_4H_4) y el benceno (C_6H_6).

Los polímeros, según su estructura química, cuentan con diferentes propiedades y particularidades. Pueden ser *termoplásticos* o *termoestables*; los primeros pueden tener cadenas largas, lineales y paralelas que no se unen transversalmente y presentan propiedades evidentes ante cambios de temperatura. Los termoestables tienen cadenas orientadas al azar que sí se entrelazan transversalmente y no muestran variación ante los cambios de temperatura.

En general, los polímeros, son químicamente inertes, pero presentan el inconveniente de tener un módulo de elasticidad bajo y un flujo plástico alto. Entre los polímeros más usados están las formulaciones epóxicas, resinas acrílicas, poliéster y poliuretanos.

Se utilizan comúnmente en construcción, para producir tres tipos de compuestos:

- **Concreto-polímero,**
- **Concreto impregnado de polímero y**
- **Concreto de cemento Pórtland polímero.**

El concreto-polímero se forma al polimerizar un monómero mezclado con agregado a temperatura ambiente, cuando se adicionan otros compuestos como el silane al sistema monómero, actúa como ligante y se mejora la adherencia entre las superficies de contacto entre el polímero y el agregado, así como la resistencia del compuesto. Se debe cuidar que el contenido de humedad del agregado sea bajo y gradarse lo suficiente como para que sea manejable. Se utiliza generalmente en reparaciones rápidas, en la fabricación de muros precolados reforzados con fibra, en bloques y tubos de pared delgada.

En el **concreto impregnado de polímero**, se seca el hidrógeno común del polímero y se satura con otro monómero, luego por radiación gamma o por métodos térmicos se produce la polimerización. Se generan de ésta manera radicales libres. Este tipo de concretos ofrecen mayor resistencia a la tensión-compresión al igual que al impacto; los módulos de elasticidad son más altos, se disminuyen el flujo plástico y la contracción por secado.

Ofrecen mayor resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo, y al ataque químico; esto se debe a que la porosidad y permeabilidad de estos concretos es más baja. Presentan el inconveniente de que su coeficiente de conductividad térmica es más elevado y que las propiedades se deterioran una vez ha sido expuesto al fuego. Este tipo de concretos es costoso.

El concreto de cemento Pórtland polímero se elabora agregando al concreto fresco un polímero en forma de solución acuosa o un monómero que es polimerizado *in situ*. Se usan como agente antiespumante para que no quede demasiado aire atrapado. Tiene mayor durabilidad y adhesión que los concretos comunes. Ofrece resistencias altas a la congelación y deshielo, a la abrasión y al impacto. El flujo plástico es mayor que el concreto simple. Se usa generalmente para cubiertas, puentes, tableros y reparaciones.

Es importante resaltar que de los polímeros, existe mucha información que en ocasiones es subjetiva y donde las propiedades ingenieriles de los compuestos están vagamente documentadas.

Debido a la naturaleza propia de los polímeros, los mecanismos mediante los cuales interactúan con los suelos son desconocidos. Otra razón es la discontinuidad de las marcas y referencias de los productos, debido a reformulaciones y cambio en las estrategias de mercado.

1.4 Revisión de literatura para la estabilización de suelos utilizando polímeros.

Son muchas las investigaciones que se han realizado, estudiando el comportamiento de los suelos finos tratados con polímeros, a continuación se describen algunas que brindan información acerca de los métodos utilizados con los correspondientes resultados:

- Se ha hecho un intento por estandarizar los ensayos, basados en objetivos específicos¹. Algunas agencias americanas como la *Texas Transportation Institute*² y la *U.S. Army Engineer Research and Development Center*, han elaborado sus propios estándares.
- Se han realizado experimentos para analizar los efectos de la estabilización de suelos limo-arcillosos en combinación con resinas epóxicas y polímeros endurecedores³, los suelos tenían límites líquidos en el rango de 37 a 45 y un índice de plasticidad entre 13 y 18, las mezclas utilizadas de resina-polímero iban en proporción 1:1. Se concluyó que un 4% de estabilizante producía grandes incrementos de la resistencia en términos del ensayo CBR (California Bearing Ratio). Además se observó que los incrementos de la temperatura de curado incrementaban la resistencia. El tiempo de curado para el agente estabilizador se reportó como de tres horas.
- En otras investigaciones^{4 5 6}, se hicieron una serie de experimentos diseñados para medir los efectos propiamente ingenieriles y los mecanismos de tres estabilizantes líquidos en 5 suelos arcillosos. De los 3 estabilizantes, una era un polímero. Los materiales arcillosos consistían de 3 materiales relativamente puros (caolinita, illita y montmorillonita sódica) y 2 suelos arcillosos de alta plasticidad. Los límites de los suelos tenían límites líquidos en el rango de 60 a 68 y los índices de plasticidad en el rango de 37 a 48.

¹ Transportation Research Board (TRB). *Evaluation of Chemical Stabilizers*. *Transportation Research Circular N° 252*, Washington D.C. 1983.

² Scullion, T. Identifying the Benefits of Nonstandard Stabilizers in High Sulfate Clay Soils: A Status Report. Personal communication, February, 2002.

³ Ajayi-Majebi, A., Grissom, W.A., Smith, L.S., and Jones, E.E. Epoxy-Resin-Based Chemical Stabilization of Fine, Poorly Graded Soil System. En *Transportation Research Record 1295*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991.

⁴ Katz, L.E., Rauch, A.F., Liljestrand, H.M., Harmon, J.S., Shaw, K.S., y Albers, H. Mechanisms of Soil Stabilization with a Liquid Ionic Stabilizer. En *Transportation Research Record 1757*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001, pp. 50-57.

⁵ Rauch, A.F., Hanmon, J.S., Katz, L.E., and Liljestrand, H.M. Liquid Soil Stabilizers: Measured Effects on Engineering Properties of Clay. Presentado en la conferencia anual de la *Transportation*

- Los resultados indicaron solamente cambios menores en las capas intermoleculares y concluyeron que los porcentajes de aplicación fueron muy poco efectivos para disminuir el proceso de desgaste de las arcillas. La investigación continuó en el sentido de estudiar los cambios de las propiedades ingenieriles de las 5 arcillas (6). El reporte concluyó que solo ocurría una reducción de la plasticidad en el suelo con montmorillonita sódica. No se reportó un efecto significativo de la densidad compacta o el contenido de humedad óptima. Tampoco se concluyó nada acerca de la reducción del potencial expansivo en ninguno de los 3 estabilizantes. Pruebas posteriores incluyendo los mismos estabilizantes (7), indicaron cambios mínimos en resultados de difracción de rayos X, área superficial específica, y niveles de aluminio-silicatos para grandes porcentajes de aditivo (50%) en relación al peso seco de arcilla.

- También se han realizado investigaciones para evaluar el potencial expansivo de 2 estabilizantes iónicos y un aditivo polimérico para estabilizar una arcilla expansiva utilizada como subrasante⁷. Se reportó que ninguno de los productos proporcionaba una plataforma efectiva de trabajo. El penetrómetro dinámico de cono y el deflectómetro de caída libre no mostraron incrementos sustanciales en la resistencia o la rigidez. Es de notar que el polímero presentó problemas de curado y se decidió excluirlo de la investigación en ensayos posteriores.

Research Board. Publicación pendiente de la *Transportation Research Board*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002.

⁶ Rauch, A.F. Mechanisms of Soil Stabilization with Liquid Stabilizers. Personal communication, February, 2002.

⁷ Scullion, T. Identifying the Benefits of Nonstandard Stabilizers in High Sulfate Clay Soils: A Status Report. Personal communication, February, 2002.

- En la Universidad del Cauca, se realizó una investigación⁸ con el fin de estudiar el comportamiento de suelos finos mediante productos no convencionales en donde los suelos utilizados corresponden a los mismos depósitos en donde se obtuvieron los suelos del presente estudio, suelos con límites líquidos entre 56 y 86, índices de plasticidad entre 8 y 32. Entre los productos estabilizantes estudiados se encuentra el polímero *Texilán-553*, un copolímero acrílico estirenado con excelente resistencia al agua y utilizado en la construcción para evitar el ataque químico, mejorar la impermeabilización y el incremento de la resistencia a la abrasión y al desgaste.

De acuerdo a la forma de preparación de las probetas y el curado de las muestras las probetas se mezclaron con el suelo, se compactaron y se parafinaron; el curado de las muestras se llevó a 7 – 28 y 90 días).

Se concluyó que para el suelo 2 (correspondiente al suelo rosado #1 en el presente estudio), el polímero en combinación con cemento produce un leve incremento de la resistencia (utilizando como ensayo, el de resistencia simple, sobre briquetas tipo Harvard Miniatura), a la vez que se obtuvo un incremento de la deformación unitaria en la falla; indicando que se mejora la propiedad de ductilidad del suelo.

Sobre el suelo 1 (correspondiente al suelo amarillo #2 en el presente estudio), no se obtuvieron resultados significativos acerca de la resistencia o a la variación de las propiedades de los suelos. Se dedujo que la acción de los estabilizantes o la mezcla de los mismos sobre un suelo, debe ser analizada de forma individual, ya que el efecto sobre materiales minerales arcillosos diferentes puede ser adverso. Una de las posibles razones de éste comportamiento es quizás, que no se permitió que el polímero endureciera adecuadamente; las probetas parafinadas impiden éste proceso.

⁸ VALENZUELA RAMIREZ, Tania Sofía y OROBIO QUIÑONES, Juan Carlos. Análisis de la utilización de productos no convencionales en la estabilización de suelos finos con cementantes hidráulicos: Materiales. Popayán, 2004, 198 p. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Instituto de Postgrados.

4 METODOLOGIA

El proyecto se realizó de acuerdo a la siguiente metodología:

- a. Revisión de conceptos técnicos en relación con los siguientes temas:
 - Mecánica de suelos enfocada al comportamiento de los suelos finos.
 - Interpretación del concepto de estabilización de suelos, desde su perspectiva convencional y no convencional.
 - Conceptos básicos de la caracterización de los polímeros, su estructura y su comportamiento en la estabilización de suelos finos.
 - Estudios previos en temas relacionados con la estabilización de suelos con materiales sintéticos, recopilación de experiencias y recomendaciones.

- b. Como resultado de una investigación previa de los suelos de la región, se escogen dos suelos finos con contenido de arcillas que resultan ser bastante representativos y que además son susceptibles de ser estabilizados.

- c. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de los suelos mediante los ensayos que recomienda el Instituto Nacional de Vías; humedad natural de los suelos, granulometría, límites de consistencia, densidad y resistencia a la compresión simple; además de la correspondiente clasificación en el Sistema Unificado de clasificación de suelos.

- d. Determinación de las composiciones químicas y mineralógicas de los suelos.

- e. Elaboración de ensayos de humedad seca, para la comprobación de las cantidades de agua de aporte del polímero, dentro del proceso de humectación de los suelos. Además de su seguimiento permanente durante la elaboración de las probetas.

- f. Análisis del efecto del polímero en el comportamiento de los suelos, para muestras de suelos con variaciones de polímero en relación al peso seco mediante la realización de ensayos de compresión simple. Evaluación de la resistencia última y observación sobre la variación obtenida respecto de la resistencia de los suelos sin adición de estabilizante.

- g. Análisis de la deformación unitaria en la falla, para los diferentes porcentajes de suelo-polímero. Indicativo de los mejoramientos o deficiencias relacionadas con la elasticidad.

- h. Elaboración del informe final.

4.1 MATERIALES UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Durante la investigación se utilizaron dos suelos finos, con las siguientes características.

4.1.1 Localización y descripción de los suelos.

Suelo Rosado # 1: Localizado en el K 10+250, talud margen derecha Popayán – Mojarras, 300 mts antes del puente sobre el Río Dos Brazos. Suelo fino color rosado, producto de la meteorización de rocas volcánicas tipo ignimbritas.

Suelo Amarillo #2: Localizado en el K 10+490, talud margen izquierdo Popayán – Mojarras, frente al punto conocido como Mi Bohío. Suelo fino color amarillo, producto de la meteorización de tobas de origen volcánico.

Los depósitos corresponden a los mismos utilizados en la tesis que sirve como referencia para el presente estudio (9). Se escogieron teniendo en cuenta que las propiedades de los suelos fueran diferentes.

Debido a que en la tesis de referencia (9), se tomaron muestras de 5 suelos finos diferentes; y que la clasificación de los suelos se hizo de forma diferente, se presenta una correlación en la Tabla 1, con el fin de facilitar las comparaciones del caso:

Tabla 1. Identificación de los suelos finos

Estabilización de suelos con polímeros	Tesis de referencia (9)
<u>Suelo Rosado # 1:</u> Localizado en el K 10+250, talud margen derecho vía Popayán – Mojarras, 300 mts antes del puente sobre el Río Dos Brazos. Suelo fino color rosado, meteorización de rocas volcánicas del tipo ignimbritas.	<u>Suelo 2:</u> Suelo de color rosado con vetas blancas localizado en la vía Popayán-Pasto frente a una antigua bodega con estructura metálica. El suelo es proveniente del talud localizado al lado derecho de la vía en la dirección norte - sur. Localizado en el K 10+250
<u>Suelo Amarillo #2:</u> Localizado en el K 10+490, talud margen izquierdo vía Popayán – Mojarras, frente al punto conocido como Mi Bohío. Suelo fino color amarillo, tobas meteorizadas de origen volcánico.	<u>Suelo 1:</u> Suelo limoso de color amarillo-café localizado en el K10+490 de la vía Popayán-Pasto cerca al estadero Mi Bohío este suelo se encontró a una profundidad de 50 cm al pie de la vía en el carril derecho dirección norte a sur. Localizado en el K 10+490.

4.1.2 Caracterización de los suelos.

▫ **Humedad natural.** Para la caracterización de los ensayos se tomaron las correspondientes humedades naturales de los suelos, según norma INV E-122, contenida en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías. Los resultados se resumen a continuación:

Tabla 2. Humedades Naturales de los suelos.

	Wn % *
Suelo Rosado #1	15.0
Suelo Amarillo #2	11.7

*Wn %: Humedad natural, expresada en porcentaje

▫ **Análisis granulométrico.** Para la determinación de la granulometría de los suelos se utilizó el método del hidrómetro según norma del Instituto Nacional de Vías INV E-124, según especificaciones. Los resultados son los siguientes:

Suelo rosado #1: de la curva granulométrica en la Figura 4, se observa que el 86 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 75 micras, razón por la cual se trata de un suelo fino. Adicionalmente se observa que el 38% de las partículas tienen un tamaño comprendido entre 75 y 4 micras y que el 48 % tienen tamaño inferior a 4 micras, de acuerdo a esto el 86% de las partículas presentan un tamaño que se encuentra dentro del rango de los limos y arcillas y también se presentan partículas de arena

Suelo Amarillo #2: de la curva granulométrica en la Figura 5., se puede observar que el 67 % de las partículas tienen un tamaño inferior a 75 micras, razón por la cual se trata de un suelo fino. Adicionalmente se aprecia que el 48% de las partículas tienen un tamaño comprendido entre 75 y 3 micras y que el 19 % tienen tamaño inferior a 4 micras, de acuerdo a esto el 67% de las partículas presentan un tamaño que se encuentra dentro del rango de los limos y también se presentan partículas de arena.

Figura 4. Curva granulométrica. Suelo Rosado #1.

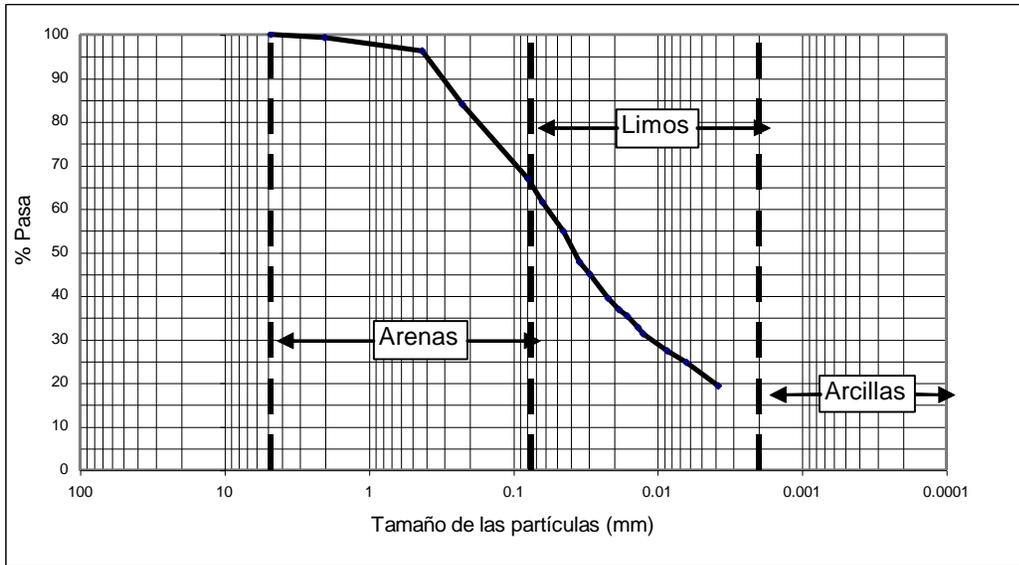
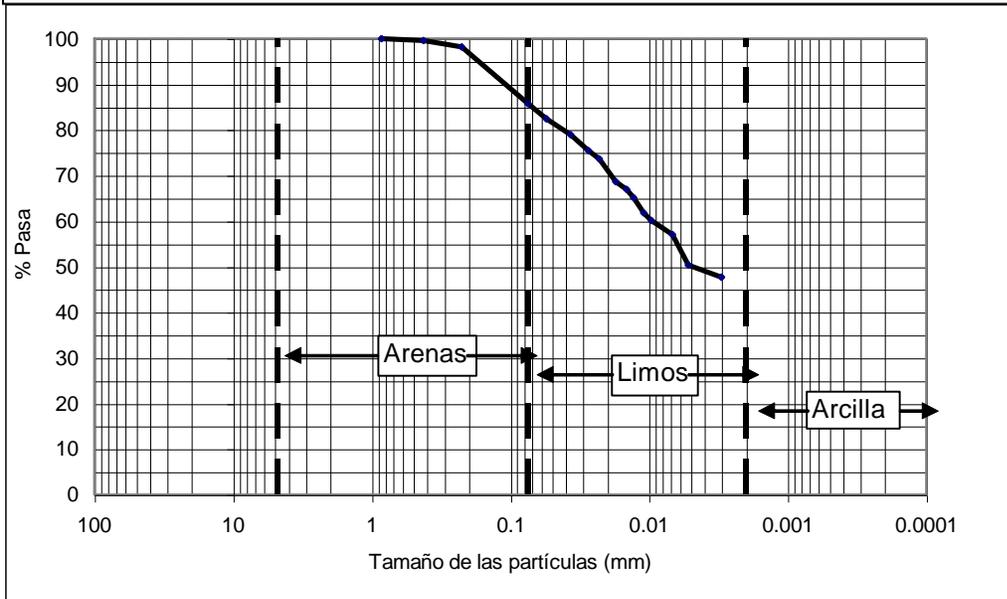


Figura 5. Curva Granulométrica. Suelo Amarillo #2.



Fuente: "Análisis de la utilización de productos no convencionales en la estabilización de suelos finos con cementantes hidráulicos." VALENZUELA RAMIREZ, Tania Sofía y OROBIO QUIÑONES, Juan Carlos.

▫ **Límites de consistencia.** Para la determinación de los límites de consistencia de los suelos se utilizó la metodología planteada por las normas INV–E–125 y INV–E–126, contenida en las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Límites de Atterberg.

	Wn % *	LL **	LP ***	IP ****
Suelo Rosado #1	15.0	37	29	8
Suelo Amarillo #2	11.7	70	39	31

*Wn: Humedad natural en porcentaje.

***LP: Límite plástico.

**LL: Límite líquido.

****IP: Índice de plasticidad.

▫ **Densidad máxima y humedad óptima.** Para determinar la densidad máxima y la humedad óptima de los suelos, se utilizó el método de compactación del Próctor Harvard Miniatura. Para esto, se llevaron al horno a 60°C durante 24 horas y se tamizaron a través de la malla N° 40. Se compactaron mediante tres capas, con 25 golpes cada una. Se elaboraron briquetas variando porcentualmente la humedad cada 3 puntos, teniendo como referencia que la humedad óptima se aproxima al punto del límite plástico; y que la variación de humedades se hiciera pasando desde la rama del estado seco al húmedo.

Tabla 4. Humedades óptimas y densidades máximas.

	Humedad óptima (%)	Densidad Seca máxima (gr/cm ³)
Suelo Rosado #1	30	1.38
Suelo Amarillo #2	49	1.03

▫ **Resistencia a la compresión simple (Humedad natural).** Para la determinación de la resistencia a la compresión de los suelos se utilizó la metodología planteada por la norma INV–E–152, contenida en las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías.

Las resistencias obtenidas, se obtienen después de compactar los dos tipos de suelo con la energía de compactación del Proctor Harvard Miniatura.

La resistencia natural para los dos tipos de suelo, se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Resistencia Natural de los suelos.

Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
Rc * (kg/cm ²)	Hn%	Rc (kg/cm ²)	Hn%
2.80	15.8	5.87	11.8

*Rc: Resistencia a la compresión simple.

▫ **Clasificación de los suelos.** De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se tiene que para los dos tipos de suelos, el porcentaje de partículas que pasa el Tamiz N° 200, es superior al 50%. Se deduce pues, que los suelos son *suelos finos* y para clasificarse se debe utilizar la *Carta de Plasticidad de Casagrande*.

Las cartas de plasticidad para los suelos, se detallan en las Figuras 6 y 7.

Figura 6. Carta de Plasticidad de Casagrande. Suelo Rosado #1.

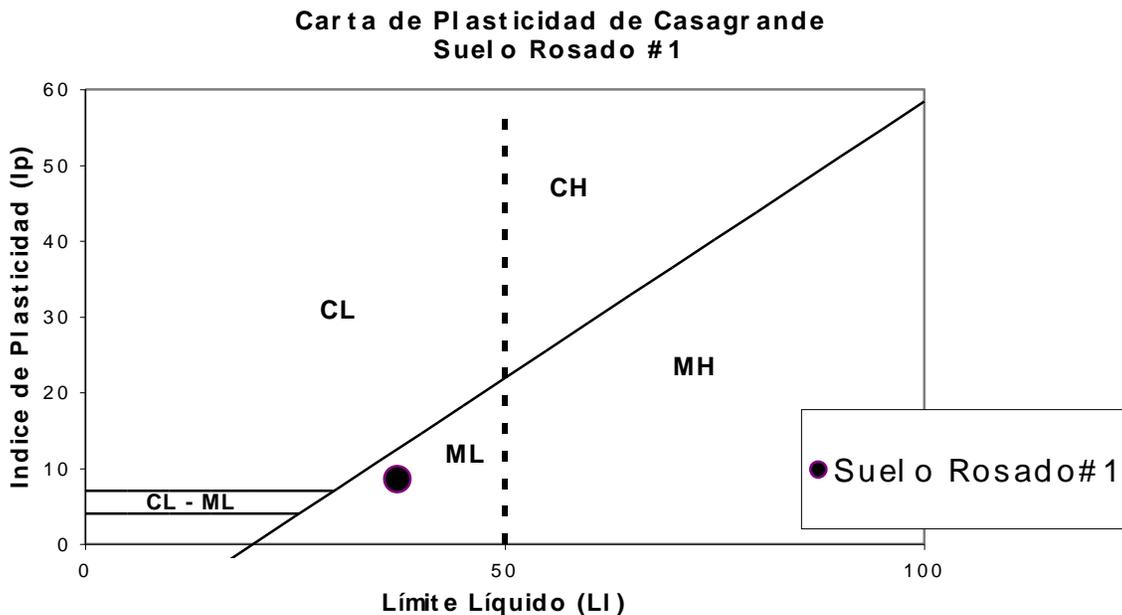
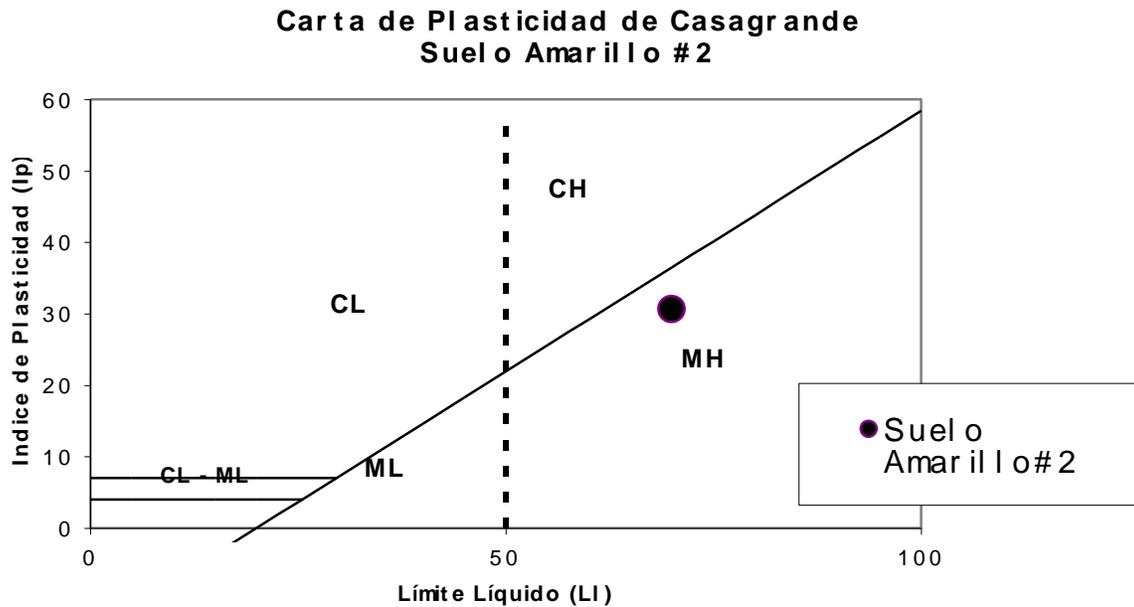


Figura 7. Carta de Plasticidad de Casagrande. Suelo Amarillo #2.



4.1.3 Análisis químico de los suelos. El análisis químico para los suelos que se trabajan, de acuerdo a Valenzuela R. Tania y Orobio Q. Juan Carlos (9), vale la pena citarlo a continuación:

Para la elaboración de los análisis químicos se siguió la siguiente metodología:

- Medición del pH.
- Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.
- Determinación de la presencia de Carbonatos.
- Prueba del Grumo.
- Determinación de Sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro.
- Caracterización química de los suelos.
- Espectroscopia Infrarroja.

➤ **Medición del pH.** El pH se mide para determinar el grado de acidez o basicidad de los materiales. Para la estabilización de un suelo es determinante el valor del pH, este depende de la cantidad de estabilizante que se debe agregar.

✓ **Metodología.** La medición del pH en las diferentes muestras de suelo corresponde a la norma **ASTM D1512-60**.

✓ **Resultados.** En la Tabla 6, se presentan los resultados obtenidos de la medición del pH en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 6. Datos de pH para las muestras de suelo.

Suelo Nº	pH
1	5.40
2	5.56
3	5.54
4	4.95

[Nota del autor: La correspondencia con los suelos de la presente investigación se resume en la Tabla 7].

Tabla 7. Datos de pH para las muestra de suelo. (Correspondencia)

Suelo	pH
Suelo Rosado #1	5.56
Suelo Amarillo #2	5.40

Como se puede observar todos los suelos presentan un pH menor que 7, lo anterior indica que se trata de un suelo ácido, que permite que se formen zonas cargadas positivamente debido a la absorción de iones de hidrógeno en los bordes expuestos de las láminas octaédricas, debido a esto se presenta una menor capacidad de intercambio catiónico y el mineral se transforma en bipolar, es decir, las caras de la lámina quedan con una carga neta residual negativa debido a la sustitución isomórfica en el conjunto de láminas, mientras que los bordes quedan cargados positivamente debidos a la absorción de iones de hidrógeno.

El hecho de presentar pH menores de 7 permite inferir que la estabilización de dichos suelos es factible mediante el empleo de Cal o Cemento con el fin de elevar su pH y permitir la formación de agentes cementantes.

[Nota del autor: El Estudio del pH, parece indicar que los suelos tienen una **baja capacidad de intercambio catiónico**, condición importante cuando se estudie el comportamiento del polímero con los suelos]

➤ **Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.** La capacidad de intercambio catiónico o mancha catiónica es la determinación de los cationes presentes en el suelo (metales positivos). Es un método analítico que indica, que cationes se pueden intercambiar cuando se estabiliza un suelo, donde los cationes más livianos se enciman y los más pesados se profundizan lo cual produce el intercambio entre unos y otros.

✓ **Metodología.** Para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico se empleó el método recomendado en las Normas Técnicas Colombianas, **NTC 5298**.

✓ **Resultados.** En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de la medición de la capacidad de intercambio catiónico en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 8. Datos de capacidad de intercambio catiónico hallados para las muestras de suelo

Suelo N°	Volumen Muestra	Humedad Muestra	Peso Muestra	C.C.C* (meq / 100 gr)
1	6.8	7.184	5.061	23.054
2	3.4	6.155	5.050	11.342
3	4.6	5.980	5.039	16.300
4	6.6	9.879	5.071	25.295

CCC*: Capacidad de intercambio catiónico

[Nota del autor: La correspondencia con los suelos de la presente investigación se resume en la Tabla 9]

**Tabla 9. Intercambio catiónico para las muestras de suelo.
(Correspondencia)**

Suelo N°	Volumen Muestra	Humedad Muestra	Peso Muestra	C.C.C (meq / 100 gr)
Rosado #1	3.4	6.155	5.050	11.342
Amarillo #2	6.8	7.184	5.061	23.054

De acuerdo con los resultados de la capacidad de intercambio catiónico se trata de suelos minerales, los cuales normalmente presentan una capacidad de intercambio catiónico comprendida entre 3 y 35 meq / 100 gr.

Tabla 10. Capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos.

Grupo	C.C.C. (meq / 100 gr)
Caolín	3 a 8
illitas	40
Montmorillonitas	80

Fuente: "Mejoramiento y Estabilización de suelos", Carlos Fernández Loaiza (1982)⁹

En la Tabla anterior se muestran los valores típicos de capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos, en la cual se puede apreciar que los suelos estudiados no presentan pureza en sus minerales arcillosos y su comportamiento indica la mezcla de caolinitas con otros minerales.

[Nota del autor: Parece reafirmarse el análisis del pH de los suelos, al encontrar que ambos suelos tienen una ***baja capacidad de intercambio catiónico***]

➤ **Determinación de la presencia de carbonatos.** Los carbonatos se determinan mediante pruebas de análisis inmediato que es la caracterización básica para toda clase de materiales en este caso el suelo.

⁹ FERNÁNDEZ LOAIZA, Carlos Mejoramiento y estabilización de suelos, Balderas 95 Primer piso Editorial Limusa, primera edición México, 1982.

✓ **Metodología.** Para la determinación de la presencia de carbonatos en las diferentes muestras de suelo se utilizó la metodología que recomiendan las Normas Técnicas Colombianas, **NTC 2581**.

✓ **Resultados.** En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de la medición de carbonatos en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 11. Resultados obtenidos con las muestras de suelo en la prueba de carbonatos.

Muestra	Carbonatos
1	Trazas
2	Trazas
3	Trazas
4	Trazas

[Nota del autor: La correspondencia de los resultados, con los de la investigación se resumen en la Tabla 12 a continuación].

Tabla 12. Resultados obtenidos con las muestras de suelo en la prueba de carbonatos. (Correspondencia)

Muestra	Carbonatos
Suelo Rosado #1	Trazas
Suelo Amarillo #2	Trazas

[Nota del autor: Se observa que todos los suelos presentan trazas de la presencia de carbonatos como uno de sus compuestos, lo cual resulta favorable ya que estos permiten la formación de agentes cementantes].

➤ **Prueba del Grumo.** Es un método analítico para identificar los minerales del suelo y en forma muy aproximada los tipos de minerales, lo cual sirve para la clasificación de los suelos con fines ingenieriles.

- ✓ **Metodología.** Para la prueba del grumo en las diferentes muestras de suelo se realizó la metodología recomendada por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC) y la Association Oficial Analytical Chemistry (AOAC).
- ✓ **Resultados.** En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba del grumo en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 13. Resultados obtenidos para la prueba de grumo.

Muestra	Tipo de mineral
1	Illita-caolinita-clorita
2	Montmorillonita
3	Montmorillonita
4	Illita-caolinita

[Nota del autor: La correspondencia, con la investigación, se resume en la Tabla 14].

Tabla 14. Resultados obtenidos en la prueba del grumo. (Correspondencia)

Muestra	Tipo de mineral
Suelo Rosado #1	Montmorillonita
Suelo Amarillo #2	illita-caolinita-clorita

[Nota del autor: De acuerdo con los resultados de la prueba del grumo se obtiene que el **suelo rosado #1** contiene minerales del tipo **Montmorillonita**. Y que el **suelo amarillo #2**, está formado por la mezcla de varios minerales arcillosos. Los resultados obtenidos para el **suelo rosado #1**, crean una duda respecto de los resultados obtenidos para el pH y la capacidad de intercambio catiónico ya que se obtuvieron indicadores de baja capacidad catiónica, característica que no es propia de los suelos con minerales del tipo **montmorillonita**]

➤ **Determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro.** Los sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro se determinan mediante pruebas de análisis inmediato que es la caracterización básica para toda clase de materiales en este caso el suelo.

✓ **Metodología.** Para la determinación de los Sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro en las diferentes muestras de suelo se utilizó la metodología recomendada por las Normas Técnicas Colombianas, **NTC 3386-9**.

✓ **Resultados.** En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos en la determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro en las diferentes muestras de suelo.

Tabla 15. Determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro.

Muestra	Peso muestra (gramos)	Sílice		Alúmina, oxido de hierro y sulfatos	
1	1.006	0.484	48.4%	0.522	52.2%
2	1.000	0.308	30.8%	0.692	69.2%
3	1.002	0.301	30.1%	0.701	70.1%
4	1.004	0.373	37.3%	0.631	63.1%

[Nota del autor: Las correspondencias con la Tabla 15, se señalan a continuación, en la Tabla 16].

Tabla 16. Determinación de sulfatos, silicatos, alúmina y óxido de hierro. (Correspondencia)

Muestra	Peso muestra (gramos)	Sílice		Alúmina, oxido de hierro y sulfatos	
Suelo Rosado #1	1.000	0.308	30.8%	0.692	69.2%
Suelo Amarillo #2	1.006	0.484	48.4%	0.522	52.2%

➤ **Caracterización granulométrica de los suelos.**

✓ **Metodología.** Para la caracterización química de las diferentes muestras de suelo se realizó la metodología recomendada por la International Union Pure Aplicación Chemistry (IUPAC), **ASTM D 1140-00**.

[Nota del autor: Este procedimiento corresponde a la determinación granulométrica de los suelos, utilizando el método del hidrómetro]

✓ **Resultados.** En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización granulométrica de las diferentes muestras de suelo.

Tabla 17. Caracterización granulométrica de los suelos.

SUELO	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	TIPO DE SUELO
1	37.9	22.4	39.6	Franco arcilloso
2	35.8	45.9	18.2	Franco (limoso)
3	81.7	17.5	0.8	Franco arenoso
4	30.5	28.3	41.3	Arcilloso

[Nota del autor: La correspondencia con los suelos de la investigación, se resumen a continuación]

Tabla 18. Caracterización química de los suelos. (Correspondencia)

SUELO	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	TIPO DE SUELO
Suelo Rosado #1	35.8	45.9	18.2	Franco (limoso)
Suelo Amarillo #2	37.9	22.4	39.6	Franco arcilloso

➤ **Espectroscopia Infrarroja.** Los métodos espectroscópicos son un conjunto de técnicas analíticas que se basan en la medición de la absorción o emisión de radiaciones electromagnéticas por resonancia en un sistema constituido por átomos o núcleos. La espectroscopia infrarroja analiza selectivamente la absorción de radiación infrarroja de una sustancia o material. El análisis de los espectros de absorción infrarroja produce información sobre la estructura de las moléculas, lo cual facilita la distinción de minerales y dentro de una serie isomórfica permite el análisis de las arcillas y la materia orgánica de suelos como un todo sin necesidad de separarlas.

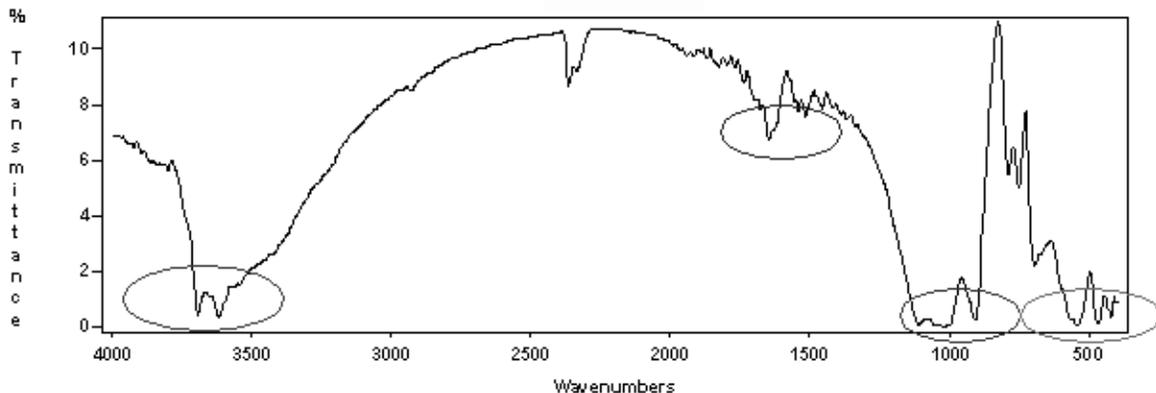
Los espectros infrarrojos suelen registrarse en cm^{-1} , el espectro infrarrojo suministra información acerca de los enlaces hidroxílicos en las laminas de agua intercala de los minerales arcillosos. Este es un método inigualable en el análisis de la orientación polar de moléculas orgánicas absorbidas sobre la superficie de los minerales arcillosos.

Actualmente para la interpretación de los espectros infrarrojos se han desarrollado archivos digitales de espectros de minerales arcillosos y otros tipos de suelos y/o materiales algunos con rutinas incorporadas al equipo obtenible con las casas de fabricantes y distribuidores de espectrofotómetros infrarrojos.

➤ **Análisis del espectro infrarrojo de la muestra 2 [Suelo Rosado #1]**

El espectro infrarrojo de la muestra 2 [suelo rosado #1], se aprecia en la Ilustración 20.

Ilustración 20. Espectro infrarrojo de la muestra 2 [Suelo Rosado #1].



En este espectro aparecen las siguientes absorciones características:

Dos bandas agudas en 3690 y 3620 cm^{-1} que se atribuyen a vibraciones del grupo OH de minerales tipo caolinita - Montmorillonita - clorita – halloisita.

En 1646 cm^{-1} se encuentra un pico de mediana intensidad que corresponde a minerales arcillosos tipo Montmorillonita.

En los espectros de minerales arcillosos tipo Montmorillonita es característico encontrar un hombro alrededor de 1200-1120 cm^{-1} asociado al máximo en 1060 cm^{-1} , como sucede en el espectro analizado. Se debe a las vibraciones del grupo Si-O.

Dos picos pequeños entre 800 y 750 cm^{-1} típicos de vibraciones de deformación del grupo Si-O en minerales como Montmorillonita, caolinita, cristobalita, y muscovita. Igualmente, a este tipo de vibración en minerales como cuarzo, caolinita y talco, corresponde la absorción ubicada en 693 cm^{-1} .

Absorción en 540 cm^{-1} debidas a vibraciones de deformación de grupos Si-O-(Al, Mg) en minerales tipo Montmorillonita, caolinita y halloisita.

Dos bandas por debajo de 470 cm^{-1} , correspondientes a vibraciones del grupo funcional Si-O en minerales como cuarzo, caolinita, clorita, muscovita y Montmorillonita.

El análisis de este espectro en conjunto con el resultado encontrado con la prueba de grumos para esta muestra de suelo, sugiere que se trata de un mineral arcilloso tipo **Montmorillonita**, con presencia de otros tipos de minerales como caolinitas, cuarzo, cloritas y halloisitas, entre otros.

➤ **Análisis del espectro infrarrojo de la muestra 1 [Suelo Amarillo #2]**

La ilustración 21 muestra el espectro infrarrojo perteneciente a la muestra de suelo 1 [Suelo Amarillo #2].

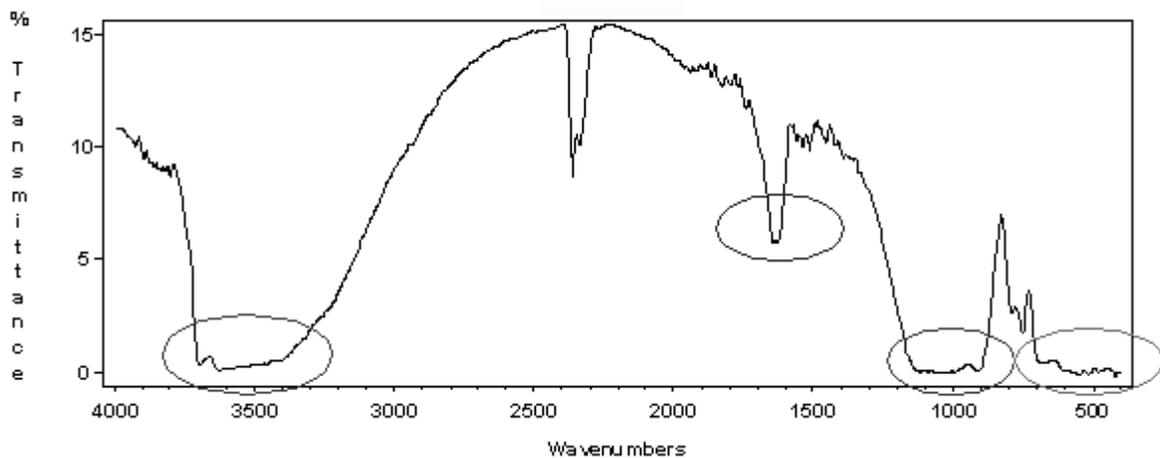
En este espectro se encuentran las siguientes absorciones:

Pico en 3693 cm^{-1} correspondiente a vibraciones de grupos OH de minerales caoliníticos. Se encuentra unido a éste un conjunto de bandas amplias entre 3630 y 3450 cm^{-1} que se atribuyen a vibraciones de grupos OH de minerales arcillosos como montmorillonitas, cloritas, caolinitas, halloisitas, gibsitas, vermiculitas y biotitas, entre otros.

Banda aguda en 1636 cm^{-1} debida a las vibraciones de los grupos funcionales (OH) de sustancias húmicas y vibraciones deformacionales de moléculas de agua, en minerales arcillosos.

Absorciones múltiples que conforman una banda ancha ubicada entre 1119 y 910 cm^{-1} , se asignan a vibraciones valenciales de grupos SiO en minerales como: montmorillonitas, cloritas, caolinitas, halloisitas, gibsitas, vermiculitas y biotitas, muscovitas entre otros.

Ilustración 21. Espectro infrarrojo de la muestra 1 [Suelo Amarillo #2].



2 bandas alrededor de 790 y 750 cm^{-1} atribuidas a vibraciones de deformación Si-O en minerales como caolinita y muscovita.

Una serie de picos entre 605 y 430 cm^{-1} conforman una amplia zona de absorción característica de vibraciones de deformación de grupos funcionales como: Si-O, Si-O-(Al, Mg) y Si-O-Me, en minerales como cuarzo, caolinita, halloisita, Montmorillonita, muscovita, nontronita, biotita, clorita, mica, entre otros, además de evidenciar la presencia del grupo SO_4 del yeso.

Mediante el análisis de este espectro, y teniendo en cuenta los resultados de la prueba de grumos contenidos en la tabla 3, se puede afirmar que este suelo presenta las características de un mineral arcilloso de tipo **caolinita-clorita-illita**, con rasgos de Montmorillonita y gibsita, entre otros. La presencia de características de ciertas micas hidratadas, como la vermiculita, confirma que esta muestra de suelo contiene illita, mineral con el cual está estrechamente relacionada.

4.1.4 Interpretación de los diferentes ensayos para los suelos.

En la siguiente tabla, se resumen los análisis realizados para los suelos:

Tabla 19. Resumen de los resultado obtenidos para los dos tipos de suelo.

	I.P.	pH	Prueba C.C.C. (meq/gm)	Presencia Carbonatos	Prueba Grumo	Presencia		Gran. Bouyoucos	Espec. Infrarrojo
						Silice	Sulfatos-Oxido hierro-Alúmina		
Suelo Rosado #1	8	5.56	11.342	Trazas	Montmorillonita	30.8%	69.2%	Franco Limoso	Montmorillonita
Suelo Amarillo #2	31	5.40	13.054	Trazas	Caolinita-clorita-illita	48.4%	52.2%	Franco Arcilloso	Caolinita-clorita-illita

Se puede apreciar la concordancia de los resultados, para ambos tipos de suelo; se presenta una excepción en los valores de pH para el **suelo rosado # 1**, donde los valores obtenidos son relativamente bajos para un suelo fino con contenido mineral de **montmorillonita**; al igual que en la prueba de **capacidad de intercambio catiónico**, donde los valores obtenidos son de difícil interpretación.

4.2 MATERIALES ESTABILIZANTES (Polímeros).

4.2.1 Introducción. La materia en general está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros.

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones. Algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Existen polímeros naturales de gran significación comercial como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel. La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon. La lana, proteína del pelo de las ovejas, es otro ejemplo. El hule de los árboles de caucho y el algodón, son también polímeros naturales importantes.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que se usan en la vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen.

4.2.2 Concepto y clasificación de los polímeros. Un polímero (del griego *poly*, muchos; *meros*, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero. Como los polímeros se forman usualmente por la unión de un gran número de moléculas menores, tienen altos pesos moleculares. No es infrecuente que los polímeros tengan pesos moleculares de 100.000 o mayores.

Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización es indicado por un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetrámero, pentámero y sucesivos. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades. De este modo, el trióximetileno, es el trímero del formaldehído, por ejemplo.

Cuando se unen entre sí más de un tipo de moléculas (monómeros), la macromolécula resultante se denomina copolímero.

Si el número de unidades es muy grande, se usa también la expresión gran polímero. Un polímero no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que tengan todas, la misma composición química y la misma estructura molecular. Hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polícarbohidratos, cuyas moléculas individuales tienen todas, el mismo peso molecular y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes poliméricos homólogos. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monómeras y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los copolímeros. Estas variedades en general no suelen afectar a las propiedades del producto final, sin embargo, se ha descubierto que en ciertos casos hubo variaciones en copolímeros y ciertos polímeros cristalinos.

Los polímeros se pueden clasificar por varios aspectos:

▫ **Clasificación de polímeros por sus propiedades físicas**

Desde un punto de vista general se puede hablar de tres tipos de polímeros:

1. Elastómeros
2. Termoplásticos
3. Termoestables.

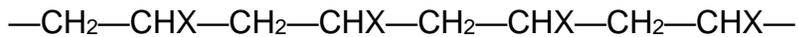
Los elastómeros y termoplásticos están constituidos por moléculas que forman largas cadenas con poco entrecruzamiento entre sí. Cuando se calientan, se ablandan sin descomposición y pueden ser moldeados.

Los termoestables se preparan generalmente a partir de sustancias semifluidas de peso molecular relativamente bajo, las cuales alcanzan, cuando se someten a procesos adecuados, un alto grado de entrecruzamiento molecular formando materiales duros que funden en descomposición (es decir, que se dividen en partículas elementales más simples) o no funden y son generalmente insolubles en los solventes más usuales.

▫ **Clasificación de polímeros por su forma.** De acuerdo a su forma se pueden clasificar en:

1. **Polímeros isómeros.** Los polímeros isómeros son polímeros que tienen esencialmente la misma composición de porcentaje (partículas monómeras), pero difieren en la colocación de los átomos o grupos de átomos en las moléculas. Los polímeros isómeros del tipo vinilo pueden diferenciarse en las orientaciones relativas (cabeza a cola, cabeza a cabeza, cola a cola, o mezclas al azar de las dos) de los segmentos consecutivos (unidades monómeras):

Cabeza a cola:



Cabeza a cabeza y cola a cola:



2. **Homopolímeros y copolímeros.** Los materiales como el polietileno, el PVC, el polipropileno, y otros que contienen una sola unidad estructural, se llaman homopolímeros. Los homopolímeros, además, contienen cantidades menores de irregularidades en los extremos de la cadena o en ramificaciones.

Por otro lado los copolímeros contienen varias unidades estructurales, como es el caso de algunos muy importantes en los que participa el estireno.

Estas combinaciones de monómeros se realizan para modificar las propiedades de los polímeros y lograr nuevas aplicaciones. Lo que se busca es que cada monómero imparta una de sus propiedades al material final; así, por ejemplo, en el ABS, el acrilonitrilo aporta su resistencia química, el butadieno su flexibilidad y el estireno imparte al material la rigidez que requiera la aplicación particular.

Evidentemente al variar las proporciones de los monómeros, las propiedades de los copolímeros van variando también, de manera que el proceso de copolimerización permite hasta cierto punto fabricar polímeros a la medida.

No solo cambian las propiedades al variar las proporciones de los monómeros, sino también al variar su posición dentro de las cadenas. Así, existen los siguientes tipos de copolímeros.

Las mezclas físicas de polímeros, que no llevan uniones permanentes entre ellos, también constituyen a la enorme versatilidad de los materiales poliméricos. Son el equivalente a las *aleaciones metálicas*.

En ocasiones se mezclan para mejorar alguna propiedad, aunque generalmente a expensas de otra. Por ejemplo, el óxido de polifenilo tiene excelente resistencia térmica pero es muy difícil procesarlo. El poliestireno tiene justamente las propiedades contrarias, de manera que al mezclarlos se gana en facilidad de procedimiento, aunque resulte un material que no resistirá temperaturas muy altas. Sin embargo en este caso hay un efecto sinérgico, en el sentido en que la resistencia mecánica es mejor en algunos aspectos que a la de cualquiera de los dos polímeros. Esto no es frecuente, porque puede ocurrir únicamente cuando existe perfecta compatibilidad entre los dos polímeros y por regla general no la hay, así que en la mayoría de los casos debe agregarse un tercer ingrediente para compatibilizar la mezcla. Lo que se emplea casi siempre es un copolímero injertado, o uno de bloque que contenga unidades estructurales de los dos polímeros.

Otras veces se mezcla simplemente para reducir el costo de material.

En otros casos, pequeñas cantidades de un polímero de alta calidad puede mejorar la del otro, al grado de permitir una nueva aplicación.

▫ **Clasificación de polímeros por su origen.** De acuerdo a su origen se clasifican como:

1. **Polímeros naturales.** Provenientes directamente del reino vegetal o animal. Por ejemplo: celulosa, almidón, proteínas, caucho natural, ácidos nucleicos, etc.
2. **Polímeros Semisintéticos.** Son los obtenidos por transformación química de los polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular, por ejemplo: la seda artificial obtenida a partir de la celulosa, nitrocelulosa, etonita, etc.
3. **Polímeros Sintéticos.** Son los que se obtienen por procesos de polimerización controlados por el hombre a partir de materias primas de bajo peso molecular. Ejemplo: nylon, polietileno, cloruro de polivinilo, polimetano, etc.

▫ **Clasificación de polímeros por su estructura.** Los polímeros, de acuerdo al tipo de estructura se clasifican como:

1. **Polímeros lineales.** Formados por largas cadenas de macromoléculas no ramificadas.
2. **Polímeros Ramificados.** Están constituidos por macromoléculas en las que la cadena principal presenta una serie de ramificaciones laterales.
3. **Polímeros Reticulados.** Están formados por macromoléculas con cadenas y ramificaciones entrelazadas en las tres dimensiones del espacio.

▫ **Clasificación de polímeros por su formación.** Según como se formen los polímeros, se clasifican en:

1. **Polimerizados.** Son polímeros cuyas macromoléculas se han formado por unión de moléculas monómeras no saturadas, por ejemplo: el polietileno.
2. **Policondensados.** Son polímeros cuyo enlace entre macromoléculas son multifuncionales, con separación de algún producto de bajo peso molecular, por ejemplo: el Nylon, las proteínas.
3. **Poliductos.** Son aquellos cuyos enlaces entre las macromoléculas son multifuncionales, sin separación de moléculas sencillas, por ejemplo: poliuretanos y resinas.

4.2.3 Propiedades físicas de los polímeros. Estudios de difracción de rayos X sobre muestras de polietileno comercial, muestran que este material, constituido por moléculas que pueden contener desde 1.000 hasta 150.000 grupos $\text{CH}_2 - \text{CH}_2$ presentan regiones con un cierto ordenamiento cristalino, y otras donde se evidencia un carácter amorfo: a éstas últimas se les considera defectos del cristal. En este caso las fuerzas responsables del ordenamiento cuasicristalino, son las llamadas fuerzas de Van der Waals.

En otros casos (nylon 66) la responsabilidad del ordenamiento recae en los enlaces de H.

La temperatura tiene mucha importancia en relación al comportamiento de los polímeros. A temperaturas más bajas los polímeros se vuelven más duros y con ciertas características vítreas debido a la pérdida de movimiento relativo entre las cadenas que forman el material. La temperatura en la cual funden las zonas cristalinas se llama temperatura de fusión (T_f). Otra temperatura importante es la de descomposición y es conveniente que la misma sea bastante superior a T_f .

A continuación se da una descripción breve de los diferentes tipos de fuerzas de atracción que controlan el comportamiento de los polímeros:

- **Fuerzas de atracción intermolecular.** Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases:
- **Fuerzas de Van der Waals.** También llamadas fuerzas de dispersión, presentes en las moléculas de muy baja polaridad, generalmente hidrocarburos. Estas fuerzas provienen de dipolos transitorios: como resultado de los movimientos de electrones, en cierto instante una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa, mientras que en otra región aparece una carga positiva equivalente. Así se forman dipolos no-permanentes. Estos dipolos producen atracciones electroestáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros, formados por miles de estas pequeñas moléculas, las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes, como en el caso del polietileno.
- **Fuerzas de atracción.** Debidas a dipolos permanentes, como en el caso de los poliésteres. Estas atracciones son mucho más potentes y a ellas se debe la gran resistencia a la tensión de las fibras de los poliésteres.
- **Otras fuerzas de atracción.** Hay atracciones de tipo iónico que son las más intensas. Un ejemplo sería el copolímero etileno-ácido acrílico, que al ser neutralizado con la base $M(OH)_2$, producirá una nueva estructura. Estos materiales se llaman ionómeros y se usan, por ejemplo, para hacer películas transparentes de alta resistencia.

La fuerza total de atracción entre las moléculas del polímero, depende del número de interacciones. Como máximo, sería igual a la energía de enlace según la Tabla 19, multiplicada por el número de átomos de carbono en el caso del polietileno o por el número de carbonílicos (enlaces del tipo C-O) en los poliésteres, etc., rara vez se alcanza este valor máximo, porque las cadenas de los polímeros no pueden, por lo general, acomodarse con la perfección que sería requerida.

Tabla 20. Energía requerida para romper cada enlace.

Tipo de enlace	Kcal */ mol
Van der Waals en CH ₄	2,4
Dipolos permanentes	3 a 5
Enlaces hidrógeno	5 a 12
Iónicos	mayores a 100

*Kcal: Kilocalorías.

4.2.4 Polímero empleado en la investigación (*TEXILAN – 553*)

La descripción técnica del polímero utilizado, se describe a continuación y está tomado directamente de la empresa ANDERCOL S.A.

Texilán 553¹⁰

Introducción. A continuación se presenta el contenido de la ficha técnica elaborada por el fabricante sobre el producto Texilán 553, el cual será utilizado durante el desarrollo de la investigación.

Generalidades. El Texilán 553 es una emulsión acuosa de un copolímero acrílico estirenado, con excelente resistencia al agua.

Características. El Texilán 553 confiere flexibilidad, da un acabado libre de tack. Tiene gran resistencia a la hidrólisis y al agua. Posee buena adherencia a varios sustratos, buen flujo y nivelación y es compatible con varios agentes coalescentes del tipo de Butil Cellosolve, Butil Carbitol, Acetato de Diglicol Butílico, etc.

Acepta cargas del tipo carbonato de calcio, caolín, etc.

Es compatible con plastificantes del tipo Dibutil Ftalato.

Campos de aplicación. El Texilán 553 es un ligante de alta calidad para pinturas base agua, selladores, enlucidos, adhesivos para pisos y baldosines, impermeabilizantes para pisos, terrazas etc., morteros y capas hidráulicas y reparaciones de mampostería en general.

¹⁰ Ficha técnica Texilán 553, Andercol S.A., Medellín, 1988

Manejo y almacenamiento. Debe almacenarse en recipientes de polietileno, vidrio o materiales inertes semejantes. Los recipientes deben permanecer cerrados para minimizar la formación de película.

El Texilán 553 es suministrado en tambores de 200 kilos.

Especificaciones.

Tabla 21. Especificaciones Técnicas del Polímero (Texilán – 553)

Características	Valor
Viscosidad Stormer(KU), 25°C	80–100
Viscosidad Brookfield (cps),25°C (Aguja 4, 20 rpm)	3500-7500
% sólidos	49.5-51.5
Kg/galón, 25°C	3.80-3.90
pH	7.5-9
Grumos	Negativo

Propiedades

- ✓ **Impermeabilidad.** Los morteros preparados con Texilán son impermeables al paso del agua.
- ✓ **Resistencia Mecánica.** Los morteros adicionados con Texilán presentan una alta resistencia a la abrasión y al impacto, así como a la compresión.
- ✓ **Adherencia.** Cuando se prepara un mortero con texilán, éste presenta una gran adherencia al substrato en que se aplica, que bien puede ser otro concreto antiguo.
- ✓ **Flexibilidad.** El Texilán 553 proporciona a los morteros una flexibilidad mayor que la de los concretos comunes.
- ✓ **Resistencia química.** La aplicación de Texilán 553 a un mortero de cemento mejora su resistencia a la intemperie y los ambientes agresivos y en general, su resistencia a los ataques químicos.

Campos de aplicación

Impermeabilización de tanques y terrazas: Por impermeabilizar el mortero, el Texilán 553 resulta ideal en el cubrimiento interior de tanques de almacenamiento de aguas y en la impermeabilización de terrazas y todo tipo de losas de concreto como en baños y cocinas.

También se utiliza en la impermeabilización horizontal y vertical de cimientos como mortero de pega y revoque para los bloques de sobrecimiento.

Endurecedor de pisos en bodegas y parqueaderos: Por la alta resistencia al impacto y la abrasión que presentan los morteros preparados con Texilán, se utilizan en el cubrimiento de pisos que presentan tráfico pesado como los de parqueaderos, patios de cargue y descargue de camiones y bodegas con alta carga de almacenamiento.

Cubrimiento superficial de estructuras hidráulicas Debido a la gran resistencia a la abrasión que imparte el Texilán a los morteros, se utiliza en el cubrimiento superficial de estructuras hidráulicas de todo tipo.

Elaboración de revoques y pañetes Por su gran adherencia y flexibilidad, los morteros y preparados con Texilán tienen excelente comportamiento cuando se aplican como revoques de muro, ya que no sólo se evita su desprendimiento, sino que presenta gran resistencia y elasticidad a los movimientos diferenciales causados por la contracción (retracción) de las estructuras de mampostería y los sismos.

Cubrimiento superficial de estructuras hidráulicas para el tratamiento de aguas. La impermeabilidad y resistencia química de los morteros adicionados con Texilán permiten el cubrimiento de estructuras para el tratamiento de agua, haciéndolas impermeables y evitando el deterioro que los agentes químicos utilizados, ocasionan en el concreto.

Estabilización de suelos: De acuerdo Andercol S.A., el fabricante y proveedor del producto, el uso de este polímero en la estabilización de suelos finos con materiales cementantes, **puede** permitir un incremento en la resistencia y mejorar las propiedades de elasticidad y permeabilidad del material.

[**Nota del autor:** Se considera que se puede presentar una afinidad entre el estabilizante y el suelo debido a que la capacidad de intercambio catiónico entre el cemento y el estabilizante, es similar a la capacidad que se espera obtener en los suelos finos]

Modo de empleo

Para lechadas: se mezcla el Texilán con el cemento y se agrega agua hasta obtener la consistencia deseada.

Para morteros y concretos: se prepara la mezcla de agregados (ya sea arena para el mortero o arena y grava para el concreto) y cemento con la dosis recomendada de Texilán, y se adiciona agua hasta obtenerse la consistencia deseada.

Dosis recomendada (En porcentaje por peso del cemento)

Impermeabilización y resistencia mecánica: cuando se usa en trabajos de impermeabilización o de recubrimientos sometidos a exigencias mecánicas altas, se utiliza Texilán en una proporción de 10% a 15% del peso del cemento.

Adherencia y flexibilidad para reparaciones: utilizado para proveer adherencia y flexibilidad en trabajos de reparación o de revoque donde no sean críticas la impermeabilidad y las exigencias mecánicas. Se dosifica el Texilán de 5% a 10% del peso del cemento.

4.3 Consideraciones preliminares de acuerdo a la caracterización de los suelos y del polímero estabilizante.

Antes de la realización del experimento, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones que se desprenden de los análisis y resultados obtenidos de la caracterización de los materiales descritos anteriormente, a continuación se describen las más importantes:

- En el momento de analizar los resultados para el suelo rosado #1, se debe tener en cuenta que no hay una correspondencia exacta de los análisis de pH y de capacidad de intercambio catiónico, de acuerdo a la clasificación que arrojan la prueba de grumo y el análisis de espectrografía. Es decir, que los suelos con contenidos minerales del tipo **montmorillonita** deberían tener una capacidad de intercambio catiónico relativamente más alta que para los suelos de tipo **caolinita-illita**. Dicha contradicción se puede haber presentado por algún error en la elaboración de dichos ensayos.

- Las mismas condiciones encontradas de pH para los suelos, permiten afirmar que suelos de este tipo presentarán buena afinidad con el estabilizante, ya que éste último tiene pH superiores a 7 (entre 7.5 - 9).

- De acuerdo a la carta técnica suministrada por el fabricante del estabilizante (*Texilán – 553*), se parte de la suposición de que la cantidad de aporte de agua en la mezcla de suelo-polímero es aproximadamente igual a la de una mezcla de cemento-polímero; sin embargo, al ser muy sensible el experimento a cualquier variación que se haga respecto de la humedad óptima, es interés del presente estudio, comprobar que dicha suposición es cierta para las condiciones en que se realizan los experimentos en el presente trabajo.

- Las resistencias a la compresión de referencia para los suelos, deben ser las resistencias que se obtengan de la compactación con la humedad óptima, pues de ésta manera es como se deben compactar en condiciones reales. La energía de compactación, es irrelevante para el estudio, pero se escoge la que proporciona el Método de Compactación del Harvard Miniatura por ser éste método, uno de los más utilizados en la investigación por su fácil reproducción.

- Como el polímero, de acuerdo a las características de su composición, no es considerado como una sustancia **cementante**, es necesario observar el comportamiento que presenta al ser curado con el suelo por períodos de tiempo superiores a 7 días.

- Se debe tener en cuenta que la empresa productora del estabilizante, recomienda la utilización del polímero para el mejoramiento de las propiedades en mezclas de **cemento-polímero**, pero no da recomendaciones claras respecto de la forma de cómo utilizarlo en mezclas de **suelo-polímero**. Por lo tanto, se parte desde la premisa de que las dosificaciones deben hacerse de forma similar.

- Se buscará la mejor forma de realizar la mezcla del suelo con el polímero, por la razón descrita anteriormente. Inicialmente, mezclando el suelo directamente con el polímero ó de no ser posible, mezclando el polímero con el agua de adición requerida para la humedad óptima. Ambas, haciendo una analogía de las mezclas de cemento-polímero en morteros.

- El curado de las probetas adoptado para ésta investigación (al aire), se escoge observando las condiciones de curado que implícitamente se detallan en la carta técnica del estabilizante, es decir, las que se acostumbran para el curado de morteros y concretos. Para éste caso, únicamente el curado al aire se considera relevante, por los resultados adversos obtenidos en investigaciones similares.

5 ANALISIS DEL EFECTO DEL CURADO AL AIRE PARA EL ESTABILIZANTE EN LOS SUELOS.

5.1 Generalidades.

Al tener una idea clara del proceso de estabilización de suelos finos mediante materiales no tradicionales, como es la utilización de polímeros; al conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos y del aditivo utilizado (un copolímero acrílico estirenado); es fácil inferir que el proceso ideal para el curado (polimerización) de las muestras que se pretenden estabilizar, es el secado al aire. De ésta manera, se permite que las moléculas libres de agua contenidas en el polímero, se liberen; permitiendo así que el estireno (el encargado del endurecimiento) forme las partículas que aportan la resistencia.

Es importante tener en cuenta que para una correcta evaluación de los datos, se debe contar con patrones de referencia que estandaricen a su vez, la elaboración de las muestras estabilizadas y que además, se ejecuten ensayos que mantengan las condiciones de frontera controladas (humedad, aporte de agua adicional del polímero dentro de las mezclas, etc.).

5.2 Determinación del aporte de humedad del polímero para las diferentes variaciones de aditivo en la mezcla.

Las humedades de horno obtenidas para las probetas elaboradas, indican que los aportes de agua estimados para el polímero, coinciden de manera bastante aproximada a las recomendaciones hechas por el fabricante del estabilizante (Carta Técnica), y que fueron consideradas para la elaboración de la presente investigación. **Ver Anexo 1.**

5.3 Determinación de la resistencia de los suelos.

5.3.1 Resistencias de referencia. Se elaboraron 100 briquetas, con el método de compactación del próctor Harvard Miniatura, a las cuales se realizaron ensayos de compresión simple para muestras de suelo natural; y con variaciones de estabilizante para el 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9% y 10%, todas en relación al peso seco del suelo.

Con el fin de tener un marco de referencia estandarizado, cada ensayo de resistencia a la compresión simple a las muestras de suelos sin aditivo y con humedad óptima, se compactó con la energía del próctor Harvard Miniatura.

Se elaboraron 5 probetas para cada uno de los suelos, en las cuales la forma de compactación se efectuó como se describe a continuación:

1. Se pesa el suelo, teniendo en cuenta la cantidad necesaria para cada una de las probetas más un porcentaje de desperdicio.
2. Teniendo como dato la humedad natural del suelo, se calcula la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima.
3. Se mezcla el suelo a mano con el agua, de forma rápida, para que se humecte el suelo de forma uniforme y que a su vez, no se presenten pérdidas de agua por evaporación o manipulación.
4. Se compacta el suelo en los moldes estándar mediante tres capas, compactadas cada una con 25 golpes, con ayuda del martillo del equipo Harvard Miniatura.
5. Se toman 2 muestras testigos de humedad para llevar al horno a 60°C durante 24 horas.
6. Se desmoldan las muestras de suelo con ayuda del gato (equipo Harvard).

7. Se colocaron las briquetas de suelo en un lugar fresco, para permitir el secado al aire durante 7 días. Este tiempo de curado no es mayor, ya que por observaciones encontradas en otros estudios, el incremento del tiempo, no mejora significativamente las resistencias. El tiempo de secado, se permite para estandarizar los resultados con los que se espera obtener con las probetas mezcladas con el estabilizante.
8. Al cumplirse el periodo de curado, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple. Se determinó la resistencia al momento de la falla al igual que su deformación unitaria.

Los resultados obtenidos de los ensayos de compresión simple para los suelos finos sin adición de estabilizante, se resumen en la Tabla N° 22.

Tabla 22. Resistencias y deformación unitaria de los suelos (Referencia).

0% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc* (Kg/cm2)	Eu**	Rc (Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	4.94	3.21	9.11	3.21
Briqueta 2 (Curado 7 días)	5.16	2.85	6.66	2.85
Briqueta 3 (Curado 7 días)	4.50	2.85	7.27	2.49
Briqueta 4 (Curado 7 días)	4.83	2.85	6.42	2.49
Briqueta 5 (Curado 7 días)	4.85	2.90	8.76	3.92
Briqueta 6 (Curado 7 días)	4.90	2.84	7.65	3.56
Promedio a 7 días de curado	4.86	2.93	7.64	2.99

*Rc: Resistencia a la compresión simple

**Eu: Deformación unitaria en la falla.

5.3.2 Fabricación de probetas con estabilizante. Es importante hacer énfasis en que, en el proceso de humectación, el polímero, por ser un aditivo líquido; aporta una cantidad de agua que es necesario tener en cuenta en el momento de realización de la mezcla. Esta cantidad de agua, se estima (de acuerdo al distribuidor del aditivo), en un rango entre el 49.5% y el 51.5%, es decir, que aproximadamente el 50% del peso del polímero es agua de constitución, que se convierte a su vez en agua de aporte en la mezcla. Todo esto, como se ha mencionado anteriormente, para **mezclas de concreto-polímero**; por lo tanto, en el presente trabajo, se tiene cuidado de hacer un chequeo de ésta recomendación para las **mezclas de suelo-polímero**.

Se elaboraron 6 probetas para cada uno de los suelos (en sus diferentes variaciones de polímero), en las cuales la forma de compactación seguía los siguientes pasos:

1. Se pesa el suelo, teniendo en cuenta la cantidad necesaria para cada una de las probetas más un porcentaje de desperdicio.
2. Se calcula la cantidad de polímero en relación al peso seco del suelo.
3. Teniendo como dato la humedad natural del suelo, se estima la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima (considerando el agua de aporte del aditivo).
4. Se prepara el aditivo con el agua, según recomendaciones del distribuidor del estabilizante. Este proceso es necesario, debido a que la viscosidad del *Texilán-553*, impide que la mezcla se haga directamente con el suelo.
5. Se mezcla el suelo a mano con el agua-aditivo, de forma rápida, para que se humecte el suelo de forma uniforme y que a su vez, no se presenten pérdidas de agua por evaporación o manipulación.
6. Se compacta el suelo en los moldes estándar mediante tres capas, compactadas cada una con 25 golpes, con ayuda del martillo del equipo Harvard Miniatura.
7. Se toman 2 muestras testigo de humedad para llevar al horno a 60°C durante 24 horas.
8. Se desmoldan las muestras de suelo con ayuda del gato (equipo Harvard).
9. Se colocan las briquetas de suelo en un lugar fresco, para permitir el tiempo de curado al aire, 5 briquetas durante 7 días y 1 a 28 días. Este tiempo de curado no es mayor, ya que por observaciones encontradas en otros estudios, el incremento del tiempo de curado, no mejora significativamente las resistencias. El tiempo de secado al aire se permite con el fin de estandarizar los resultados en relación a los que se obtienen para las briquetas elaboradas con polímero.
10. Al cumplirse el periodo de curado, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple. Se determinó la resistencia al momento de la falla al igual que su deformación unitaria.

A continuación se describe un ejemplo con los cálculos típicos:

Ejemplo:

Se tiene como dato la humedad óptima (deseada) para el suelo rosado	→	30 %
Se conoce la humedad inicial de la muestra	→	15 %
Por lo tanto la humedad adicional es: $30\% - 15\% =$	→	15 %
Si el peso de la muestra húmeda necesaria para elaborar las seis briquetas es:	→	130 gm
El peso de la muestra seca será = $\text{Peso Húmedo} / (1 + \omega)$	→	113.04 gm
Por lo tanto el agua requerida será = $\text{Peso Seco} * \omega$	→	16.96 gm
Y si la cantidad de necesaria de polímero es de 2 % la cantidad de polímero que se necesita es = $\text{Peso Seco} * 2\%$	→	2.26 gm
Ahora, como el polímero aporta aproximadamente el 50 % de agua en la hidratación, el aporte de agua será = $2.26 \text{ gm} / 2$	→	1.13 gm
Por lo tanto la cantidad de agua requerida será = $16.96 \text{ gm} - 1.13 \text{ gm}$		15.83 gm

Las humedades de horno obtenidas se resumen a continuación:

Tabla 23. Ejemplo de humedad de horno para briquetas con 2% de polímero

	2 % Polímero	
Peso Suelo Húmedo + Recipiente	63.96	60.18
Peso Suelo Seco + Recipiente	53.51	49.44
Peso Recipiente	16.17	13.23
Humedad Real	27.99%	29.66%
Humedad Promedio	28.82%	
Humedad Deseada (Optima)	30.00%	
Desviación Estándar	0.59%	

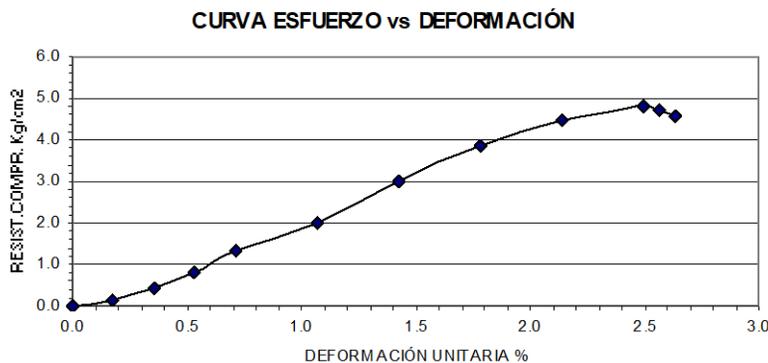
Los resultados de los ensayos de compresión simple confinada para la muestra N° 1 del **suelo fino color rosado** se describen a continuación:

Tabla 24. Resultados obtenidos del ensayo de compresión simple confinada para la briketa con 2 % polímero (Suelo Rosado #1)

Deformación (0.001")	Lectura de Carga (0.0001")	Carga Kg	E*	Area Corregida cm ²	Resistencia kg/cm ²
0	0	0.00	0.00	8.55	0.00
5	9	1.31	0.18	8.57	0.15
10	26	3.78	0.36	8.58	0.44
15	47	6.84	0.53	8.60	0.80
20	78	11.35	0.71	8.61	1.32
30	120	17.46	1.07	8.65	2.02
40	179	26.04	1.42	8.68	3.00
50	232	33.76	1.78	8.71	3.88
60	270	39.29	2.14	8.74	4.49
70	289	42.05	2.49	8.77	4.79
72	285	41.47	2.56	8.78	4.72
74	275	40.01	2.64	8.78	4.55

*E: Deformación unitaria.

Figura 8. Curva Esfuerzo vs. deformación (Suelo Rosado #1 – polímero 2%)



➤ **ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LAS DIFERENTES VARIACIONES DEL POLÍMERO EN LA MEZCLA.**

- **Resultados para estabilizante al 2% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 25. Resistencias del suelo-estabilizante (2% polímero)

2% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc (Kg/cm ²)	Eu	Rc (Kg/cm ²)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	4.79	2.49	5.03	2.14
Briqueta 2 (Curado 7 días)	5.92	2.85	6.08	3.21
Briqueta 3 (Curado 7 días)	2.44	1.78	4.76	2.47
Briqueta 4 (Curado 7 días)	2.95	2.14	4.74	2.14
Briqueta 5 (Curado 7 días)	2.91	1.78	6.21	3.21
Briqueta 6 (Curado 28 días)	3.54	1.78	6.50	2.49
Promedio a 7 días de curado	3.80	2.21	5.36	2.63
*Variación a 7 días (%)	-21.71	-24.69	-29.83	-11.97

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Hay una disminución en la resistencia de las briquetas para los 2 tipos de suelo. Esta posible reducción se debe quizás a que el polímero es incapaz de recubrir totalmente las partículas. Sin embargo la pérdida de resistencia es un poco mayor en el suelo amarillo.
- Para ambos suelos se produce una pérdida en la deformación unitaria en la falla, que si se interpreta a la par con la pérdida de resistencia; indica que se está perdiendo capacidad elástica y se está incrementando la rigidez. Por lo tanto se puede decir que se hacen más frágiles con éste porcentaje de aditivo, en relación al suelo natural compactado con la humedad óptima. Las propiedades que se afectan, son indispensables en el proceso de estabilización.

- La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, no se incrementa de forma significativa respecto de las que se promedian para el curado a 7 días, por lo tanto no es representativa dentro de la investigación.

▫ **Resultados para estabilizante al 3% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 26. Resistencias del suelo-estabilizante (3% polímero)

3% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc (Kg/cm2)	Eu	Rc (Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	4.50	2.49	7.74	3.21
Briqueta 2 (Curado 7 días)	2.91	1.78	9.01	3.56
Briqueta 3 (Curado 7 días)	4.33	2.49	8.07	3.56
Briqueta 4 (Curado 7 días)	6.59	2.85	9.53	4.27
Briqueta 5 (Curado 7 días)	5.98	2.85	9.14	3.92
Briqueta 6 (Curado 28 días)	5.10	2.49	8.78	3.56
Promedio a 7 días de curado	4.86	2.49	8.70	3.70
*Variación a 7 días (%)	0.12	-15.01	13.79	23.80

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, la resistencia se aproxima significativamente a la resistencia del suelo natural.
- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en 13.79%.
- Estos incrementos no representan una estabilización mecánica efectiva.
- Para el suelo rosado #1, hay una pérdida en la deformación unitaria en la falla, que al interpretarse en conjunto con la resistencia, indica que hay una pérdida de elasticidad (incrementándose la rigidez, pero haciéndolo más frágil). Hay una tendencia a aumentar la deformación unitaria en la falla a medida que se aumenta el porcentaje de aditivo.
- Para el suelo amarillo #2, hay un incremento ligero de la deformación unitaria, que si se analiza a la par con el resultado de la resistencia, nos indica que se mejoran ligeramente las propiedades ingenieriles. El suelo se hace un poco más elástico y un tanto más resistente.

- Las resistencias de las briquetas llevada a curado de 28 días, se incrementan un poco por encima del promedio de las briquetas con curado a 7 días, pero no significativamente. Se comprueba así que el curado a más de 7 días no incrementa la resistencia para este porcentaje de polímero.
 - Con éste porcentaje de aditivo, parece ser que las partículas de suelo se recubren más eficientemente. El comportamiento del suelo-aditivo tiende a adquirir las cualidades del estabilizante.
- **Resultados para estabilizante al 4% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 27. Resistencias del suelo-estabilizante (4% polímero)

4% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm ²)	Eu	Rc(Kg/cm ²)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	5.60	3.92	10.36	4.27
Briqueta 2 (Curado 7 días)	5.90	1.78	9.53	3.56
Briqueta 3 (Curado 7 días)	5.50	2.14	9.51	3.92
Briqueta 4 (Curado 7 días)	5.20	2.20	8.45	3.56
Briqueta 5 (Curado 7 días)	4.82	2.49	8.79	3.56
Briqueta 6 (Curado 28 días)	5.50	2.50	8.51	3.21
Promedio a 7 días de curado	5.40	2.51	9.33	3.77
*Variación a 7 días (%)	11.29	-14.53	22.03	26.14

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, la resistencia se incrementa de forma proporcional al incremento de polímero, pero no de forma significativa como estabilización mecánica.
- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en forma proporcional al incremento de aditivo estabilizante, pero de forma menos marcada que para el suelo rosado #1. Este incremento tampoco es significativo como estabilización.
- Para el suelo rosado #1, hay una pérdida en la deformación unitaria en la falla, que al interpretarse en conjunto con la resistencia, indica que hay una pérdida de elasticidad (incrementándose la rigidez, pero haciéndolo más frágil). Continúa el aumento de la deformación unitaria en la falla a medida que se incrementa el aditivo.

- Para el suelo amarillo #2, hay un incremento ligero de la deformación unitaria, que si se analiza a la par con el resultado de la resistencia, nos indica que se mejoran ligeramente las propiedades ingenieriles. El suelo se hace un poco más elástico y un tanto más resistente.
 - El incremento de aditivo en los 2 tipos de suelo, no afecta la variación de la deformación unitaria en la falla en relación al suelo estabilizado con una cantidad de aditivo igual a 3%.
 - La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, se mantiene cerca del promedio de las curadas a 7 días. Su deformación unitaria mantiene la misma tendencia.
- **Resultados para estabilizante al 5% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 28. Resistencias del suelo-estabilizante (5% polímero)

5% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm2)	Eu	Rc(Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	6.70	3.56	10.45	3.56
Briqueta 2 (Curado 7 días)	6.84	2.85	10.35	3.56
Briqueta 3 (Curado 7 días)	5.72	3.60	8.94	3.21
Briqueta 4 (Curado 7 días)	5.60	3.50	8.90	3.56
Briqueta 5 (Curado 7 días)	6.40	3.46	8.50	3.92
Briqueta 6 (Curado 28 días)	6.20	2.49	8.63	3.56
Promedio a 7 días de curado	6.25	3.39	9.43	3.56
*Variación a 7 días (%)	28.75	15.76	23.34	19.05

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, continúa la tendencia de incremento de resistencia de forma proporcional al incremento de aditivo, pero aún no significativo como estabilizante.
- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en forma proporcional al incremento de aditivo estabilizante, pero de forma menos marcada que para el suelo rosado #1. Este incremento tampoco es significativo como estabilización.

- Para el suelo rosado #1 hay un incremento de la deformación unitaria en la falla, si se interpreta a la par con el incremento de la resistencia se deduce que se están mejorando las propiedades de los suelos, pero no de forma significativa para éste porcentaje de aditivo.
- Para el suelo amarillo #2 se observa una disminución de la deformación unitaria en la falla, al analizar éste comportamiento en relación al incremento ligero de resistencia, se deduce que se mejoran ligeramente la elasticidad y la rigidez, pero se aumenta un poco la fragilidad.
- La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, se mantiene cerca del promedio de las curadas a 7 días. Su deformación unitaria mantiene la misma tendencia. El tiempo de curado superior a los 7 días no es representativo para mejorar resistencia ni deformación unitaria en la falla.

▫ **Resultados para estabilizante al 6% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 29. Resistencias del suelo-estabilizante (6% polímero)

6% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm2)	Eu	Rc(Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	7.27	2.50	7.85	3.92
Briqueta 2 (Curado 7 días)	6.23	2.49	10.42	2.85
Briqueta 3 (Curado 7 días)	6.79	2.60	7.77	3.21
Briqueta 4 (Curado 7 días)	7.97	2.14	12.62	4.99
Briqueta 5 (Curado 7 días)	5.36	3.5	9.68	3.92
Briqueta 6 (Curado 28 días)	5.40	3.49	7.42	4.27
Promedio a 7 días de curado	6.72	2.80	9.67	3.78
*Variación a 7 días (%)	38.47	-18.62	26.48	26.27

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, continúa la tendencia de incremento de resistencia de forma casi proporcional al incremento de aditivo, se esperaba un valor un poco más alto, pero ésta variación no se aleja demasiado de la tendencia que se estaba generalizando para cada incremento.

- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en forma proporcional al incremento de aditivo estabilizante, pero de forma menos marcada que para el suelo rosado #1. Este incremento tampoco es significativo como estabilización.
 - Para el suelo rosado #1 se disminuye un poco el valor de la deformación unitaria en la falla, respecto de la mezcla con polímero anterior (5% de aditivo); incluso se hace muy cercano al valor de la deformación unitaria en la falla para 0% de aditivo.
 - La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, disminuye en relación al promedio de las curadas a 7 días. Su deformación unitaria se incrementa para los dos suelos. Para éste porcentaje de aditivo, parece que se mejora la elasticidad a medida que se incrementa el tiempo de curado.
- **Resultados para estabilizante al 7% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 30. Resistencias del suelo-estabilizante (7% polímero)

7% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm2)	Eu	Rc(Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	7.27	3.21	8.69	3.56
Briqueta 2 (Curado 7 días)	7.20	3.21	10.56	3.21
Briqueta 3 (Curado 7 días)	6.58	2.49	8.48	3.56
Briqueta 4 (Curado 7 días)	7.44	3.21	9.17	3.92
Briqueta 5 (Curado 7 días)	6.00	2.49	11.45	3.92
Briqueta 6 (Curado 28 días)	8.20	4.27	8.04	3.56
Promedio a 7 días de curado	6.90	2.92	9.67	3.63
*Variación a 7 días (%)	42.05	-0.34	26.50	21.46

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, el incremento proporcional de la resistencia en relación a la cantidad de aditivo se acentúa.
- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en forma proporcional al incremento de aditivo estabilizante. La magnitud de dicha proporción se mantiene.

- Para éste porcentaje de aditivo, la deformación unitaria en la falla para el suelo rosado #1 se hace significativamente igual al del suelo sin aditivo. Al aumentarse la resistencia y mantenerse la deformación unitaria en la falla en relación al suelo sin aditivo, se puede afirmar que se están mejorando las propiedades elásticas y de rigidez.
 - En el suelo amarillo #2 se observa un incremento de la deformación unitaria en la falla a la par del incremento de resistencia. Se mejoran ligeramente las propiedades elásticas.
 - La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, aumenta en relación al promedio de las curadas a 7 días para el suelo rosado #1, pero disminuye para las curadas a 7 días para el suelo amarillo #2.
 - La deformación unitaria en la falla para las probetas curadas a 28 días, se mejora para el suelo rosado #1, pero permanece significativamente igual a la del suelo amarillo #2.
 - El comportamiento de la probeta a 28 días, continúa sin ser determinante en los efectos de resistencia y deformación unitaria en la falla, en ninguno de los 2 suelos.
- **Resultados para estabilizante al 8% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 31. Resistencias del suelo-estabilizante (8% polímero)

8% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm2)	Eu	Rc(Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	7.89	3.56	9.37	3.92
Briqueta 2 (Curado 7 días)	8.28	3.56	9.51	3.92
Briqueta 3 (Curado 7 días)	7.82	2.49	10.92	4.63
Briqueta 4 (Curado 7 días)	8.22	3.21	8.73	4.27
Briqueta 5 (Curado 7 días)	8.10	3.30	9.90	4.30
Briqueta 6 (Curado 28 días)	7.90	3.28	9.70	4.25
Promedio a 7 días de curado	8.06	3.22	9.69	4.21
*Variación a 7 días (%)	66.02	9.96	26.71	40.64

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Hay un incremento de resistencia para los dos tipos de suelo, cada uno siguiendo la tendencia proporcional respecto al aumento en la cantidad de aditivo.
 - En ambos suelos, se observa un aumento de la deformación unitaria en la falla. La tendencia del incremento es proporcional, pero un tanto mayor para el suelo amarillo #2 en comparación con la del suelo rosado #1. Este aumento, es indicador de incremento de la elasticidad del suelo.
 - La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, se considera aproximadamente igual al promedio de las curadas a 7 días. Su deformación unitaria se mantiene también dentro del rango de las probetas promedio. El tiempo de curado superior a los 7 días sigue sin ser representativo para mejorar resistencia ni deformación unitaria en la falla.
- **Resultados para estabilizante al 9% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 32. Resistencias del suelo-estabilizante (9% polímero)

9% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm2)	Eu	Rc(Kg/cm2)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	10.73	4.99	9.10	4.99
Briqueta 2 (Curado 7 días)	10.25	4.99	8.83	3.92
Briqueta 3 (Curado 7 días)	8.94	4.27	8.92	4.27
Briqueta 4 (Curado 7 días)	9.32	3.92	10.65	4.27
Briqueta 5 (Curado 7 días)	8.71	4.63	10.96	4.63
Briqueta 6 (Curado 28 días)	9.40	4.70	9.80	4.60
Promedio a 7 días de curado	9.59	4.56	9.69	4.42
*Variación a 7 días (%)	97.49	55.53	26.79	47.59

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, hay un incremento alrededor de los 488 Kpa. (97.49%) respecto de la resistencia del suelo natural. Este incremento se puede considerar como moderadamente efectivo en un proceso de estabilización mecánica.

- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en forma proporcional al incremento de aditivo estabilizante. La magnitud de dicha proporción se mantiene a la par de las anteriores, es decir, no es significativo como estabilización mecánica.
 - En ambos suelos, se observa un aumento de la deformación unitaria en la falla. El incremento en el suelo rosado #1 supera la tendencia proporcional que se traía para menores porcentajes de polímero. A la par del incremento en la resistencia, se mejora la elasticidad del suelo.
 - En el suelo amarillo #2, la tendencia de incremento de la deformación unitaria en la falla a la par con el incremento de aditivo se mantiene. Se mejoran así las propiedades elásticas, pues la resistencia también se incrementó.
 - La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, se mantiene cercana a la resistencia de las probetas promedio curadas a 7 días. Su deformación unitaria se acerca también a la deformación promedio a 7 días. El tiempo de curado superior a los 7 días sigue sin ser representativo para mejorar resistencia ni deformación unitaria en la falla.
- **Resultados para estabilizante al 10% en peso (Relación al peso seco del suelo).**

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 33. Resistencias del suelo-estabilizante (10% polímero)

10% Polímero	Suelo Rosado #1		Suelo Amarillo #2	
	Rc(Kg/cm ²)	Eu	Rc(Kg/cm ²)	Eu
Briqueta 1 (Curado 7 días)	10.89	4.63	11.15	4.27
Briqueta 2 (Curado 7 días)	9.34	4.63	8.38	3.56
Briqueta 3 (Curado 7 días)	11.69	4.99	8.47	4.27
Briqueta 4 (Curado 7 días)	8.99	2.85	9.02	3.92
Briqueta 5 (Curado 7 días)	9.98	5.34	9.90	4.27
Briqueta 6 (Curado 28 días)	12.24	6.06	12.10	3.56
Promedio a 7 días de curado	10.18	4.49	9.38	4.06
*Variación a 7 días	109.60	53.07	22.76	35.63

*Variación tomada respecto de la muestra patrón.

De los resultados anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para el suelo rosado #1, hay un incremento alrededor de los 532 Kpa. respecto de la resistencia del suelo natural compactado sin aditivo.
- Para el suelo amarillo #2 la resistencia se incrementa en 174 Kpa. respecto del suelo compactado sin aditivo. Pero se disminuye en relación al suelo-aditivo con porcentaje de polímero de 9%.
- En ambos suelos, se observa un aumento de la deformación unitaria en la falla en relación al suelo compactado sin aditivo. Se mejora de ésta manera el comportamiento elástico.
- En el suelo amarillo #2, la tendencia de incremento de la deformación unitaria en la falla a la par con el incremento de aditivo se mantiene. Se mejoran así las propiedades elásticas, pues la resistencia también se incrementó.
- La resistencia de la briqueta llevada a curado de 28 días, se mantiene cercana a la resistencia de las probetas promedio curadas a 7 días. Su deformación unitaria se acerca también a la deformación promedio a 7 días. El tiempo de curado superior a los 7 días sigue sin ser representativo para mejorar resistencia ni deformación unitaria en la falla.

CONCLUSIONES

1. Se comprueba la suposición respecto de la cantidad de agua de aporte del polímero dentro de la mezcla de suelo-polímero. La importancia de ésta, era imperativa dentro del estudio, pues se sabe que una alteración significativa de los valores adoptados como humedad óptima dentro de un proceso de compactación-estabilización, conlleva a la obtención de un error dentro de la investigación.
2. La forma más adecuada para mezclar el estabilizante con los suelos, consiste en la previa dilución del polímero en agua, para su posterior mezcla con el suelo.
3. Las resistencias utilizadas como resistencias patrón, son las resistencias obtenidas de la compactación de los suelos con la humedad óptima; pues de ésta manera es como se deberían compactar los suelos en condiciones reales. La energía de aplicación, es irrelevante para el estudio; pero se escoge la que proporciona el Método de Compactación del Harvard Miniatura por ser muy utilizado en investigación y de fácil reproducción.
4. Las condiciones de curado al aire a 7 días permiten que el suelo-aditivo curen de forma óptima. La superficie de las probetas al cabo de éste tiempo, presenta condiciones secas.
5. Las resistencias de las diferentes mezclas indican un mejoramiento del comportamiento mecánico de los suelos, de mejor manera en el suelo rosado #1 que es un suelo de baja plasticidad y de forma menos eficiente en el suelo amarillo #2 que tiene plasticidad mayor. La diferencia de plasticidades, es la principal causa de éste comportamiento; pues el tamaño de las partículas y las características de las partículas arcillosas en cada uno, condicionan la afinidad con el estabilizante. Se cree que la mayor superficie específica de los suelos más plásticos, requieren de mayores cantidades de aditivo para recubrir totalmente las partículas.

6. Si bien hay una mejora del comportamiento mecánico, no se puede hablar de que se haya presentado una estabilización efectiva; pues si se comparan los resultados con los que se obtienen al estabilizar los suelos con métodos tradicionales, las diferencias son considerables. La adición de cal y cemento en los suelos en el orden del 8% en peso seco, produce incrementos en la resistencia cercanos del 1700% y 1000% respectivamente. Mientras que para el estabilizante, en una proporción del 10% en polímero para los dos suelos; se obtuvieron incrementos de resistencia cercanas al 110% para el suelo rosado y al 13% para el suelo amarillo.
7. Las deformaciones unitarias en la falla siguen una tendencia similar al comportamiento mecánico, es decir que a medida que se incrementan los porcentajes de aditivo se mejoran las características mecánicas. Este incremento proporcional en la deformación unitaria, indica un mejoramiento de las propiedades elásticas de los suelos. Pero, estas mejoras son poco significativas. El suelo rosado #1 aumenta la deformación unitaria un 58% más que la deformación unitaria obtenida para el suelo sin aditivo, mientras que el suelo amarillo #2 la incrementa apenas un 28%.
8. Se observa una pérdida de resistencia en relación a las muestras compactadas sin aditivo para bajos porcentajes de aditivo (2%). Es posible que éste comportamiento se deba a que la gran superficie específica de las partículas requiere de mayores cantidades de aditivo para que la cohesión de las partículas sea óptima. Esta pequeña cantidad de polímero, quizás reacciona de forma instantánea antes de la mezcla.
9. Cuando los porcentajes de aditivo se acercan al 3% en relación al peso seco del suelo, las resistencias son significativamente iguales a las obtenidas con la compactación del suelo con la humedad óptima. De ahí en adelante, el incremento de aditivo mejora de manera proporcional tanto el comportamiento mecánico como el de la deformación unitaria en la falla.
10. Del comportamiento de las probetas que se llevaron a curado de 28 días, se puede afirmar que no mejoraron de manera considerable las propiedades de los suelos; por lo tanto se hace innecesario que se prolongue el tiempo de curado de las muestras.
11. El efecto estabilizante del polímero, no es efectivo en relación al mejoramiento de la resistencia; pero si se advierte un incremento relativo, respecto de la forma en que se realizó el curado de las muestras.

12. Al analizar el efecto del estabilizante de acuerdo al contenido mineral para cada uno de los suelos, se puede afirmar que el mejoramiento de la resistencia a la compresión para el suelo rosado #1 fue más significativo que para el suelo amarillo #2, debido a la mayor capacidad de intercambio catiónico que poseen los minerales del tipo **montmorillonita**.
13. Respecto del análisis químico, no se puede concluir de forma precisa, respecto de todos los aspectos que se incluyen en éste trabajo; pues parece ser que la estabilización con éste tipo de polímeros es de tipo FISICO. Pero es bueno aclarar que de acuerdo a la literatura, se sabe que la presencia de sulfatos afecta las estabilizaciones con cal, faltaría ver de que forma afecta las estabilizaciones con polímeros acrílicos.
14. Es importante resaltar que de los resultados obtenidos del pH en los suelos finos y en el polímero, se puede deducir que existe una gran afinidad entre ellos, favoreciendo la capacidad de intercambio catiónico (efecto ligante).
15. De acuerdo a la observación parece que el incremento en la resistencia para los suelos estabilizados, lo brinda netamente la fase GEL del polímero.
16. La superficie específica alta del suelo rosado #1 (montmorillonita) en comparación con la superficie específica del suelo amarillo #2 (caolinita-iliita), parece no representar una dificultad, desde el punto de vista del recubrimiento de las partículas. Debido quizá a la preparación del estabilizante con el agua, de ésta manera las moléculas del polímero se disuelven, se reduce su viscosidad y se favorece el intercambio catiónico en la mezcla.
17. Con el fin de chequear el comportamiento de las probetas de suelo con estabilizante, ante la acción del agua, se sumergieron en agua por 24 horas. La resistencia obtenida después de la inmersión, no es muy diferente de las probetas que no se sumergieron.
18. Se sugiere por lo tanto, continuar con la investigación de estabilización de suelos finos mediante polímero acrílicos, en el sentido de analizar de que manera se mantiene o no la resistencia de los suelos, ante el efecto de la inmersión.

19. Otro aspecto interesante que se debe tener en cuenta, si se piensa en profundizar con éste tipo de investigación, es ver de que manera se pueden obtener buenos resultados en la estabilización mecánica; mezclando los suelos finos con suelos gruesos estabilizados con polímeros, ya que éstos últimos demostraron de acuerdo a la literatura, resultado óptimos.

GLOSARIO

AGLOMERANTE: material que une fragmentos de una o varias sustancias y da cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico.

ASFALTO: betunes sólidos y semisólidos que desarrollan propiedades ligantes y cuya consistencia disminuye al ser calentados.

COMPRESIBILIDAD: cambio volumétrico en un suelo, dado por una disminución de su volumen.

ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA: propiedad de un suelo para controlar o evitar los cambios de volumen.

EMULSIÓN: dispersión de un líquido o un sólido en otro no miscible con el.

ESTIRENO: hidrocarburo insaturado, oleoso y de olor penetrante, usado en la industria para la fabricación de polímeros plásticos y resinas sintéticas, como el poliéster.

LIGANTE: material que tiene la propiedad de unirse a otros o unir otros materiales.

MICELAS (en polímeros): monómero o grupo de monómeros que junto con un agente emulsificante que los rodea permanecen aislados antes de iniciar la polimerización.

MONÓMEROS: moléculas de bajo peso molecular.

PERMEABILIDAD: facilidad o dificultad con la que puede ser penetrado o traspasado un material por el agua u otro fluido.

POLIMERIZACIÓN: proceso a través del cual los monómeros se transforman o combinan para formar los polímeros.

POLÍMEROS: Moléculas de alto peso molecular.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Transportation Research Board (TRB). *Evaluation of Chemical Stabilizers. Transportation Research Circular N° 252, Washington D.C. 1983.*
- ² Scullion, T. Identifying the Benefits of Nonstandard Stabilizers in High Sulfate Clay Soils: A Status Report. Personal communication, February, 2002.
- ³ Ajayi-Majebi, A., Grissom, W.A., Smith, L.S., and Jones, E.E. Epoxy-Resin-Based Chemical Stabilization of Fine, Poorly Graded Soil System. En *Transportation Research Record 1295*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991.
- ⁴ Katz, L.E., Rauch, A.F., Liljestrand, H.M., Harmon, J.S., Shaw, K.S., y Albers, H. Mechanisms of Soil Stabilization with a Liquid Ionic Stabilizer. En *Transportation Research Record 1757*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001, pp. 50-57.
- ⁵ Rauch, A.F., Hanmon, J.S., Katz, L.E., and Liljestrand, H.M. Liquid Soil Stabilizers: Measured Effects on Engineering Properties of Clay. Presentado en la conferencia anual de la *Transportation Research Board*. Publicación pendiente de la *Transportation Research Board*, TRB, Nacional Research Council, Washington, D.C., 2002.
- ⁶ Rauch, A.F. Mechanisms of Soil Stabilization with Liquid Stabilizers. Personal communication, February, 2002.
- ⁷ Scullion, T. Identifying the Benefits of Nonstandar Stabilizers in High Sulfate Clay Soils: A Status Report. Personal communication, February, 2002.

⁸ VALENZUELA RAMIREZ, Tania Sofía y OROBIO QUIÑONES, Juan Carlos. Análisis de la utilización de productos no convencionales en la estabilización de suelos finos con cementantes hidráulicos: Materiales. Popayán, 2004, 198 p. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Instituto de Postgrados.

⁹ FERNÁNDEZ LOAIZA, Carlos Mejoramiento y estabilización de suelos, Balderas 95 Primer piso Editorial Limusa, primera edición México, 1982

¹⁰ Ficha técnica Texilán 553, Andercol S.A., Medellín, 1988.

ANEXOS

Anexo 1. Humedades de Horno para los suelos

Suelo Rosado #1

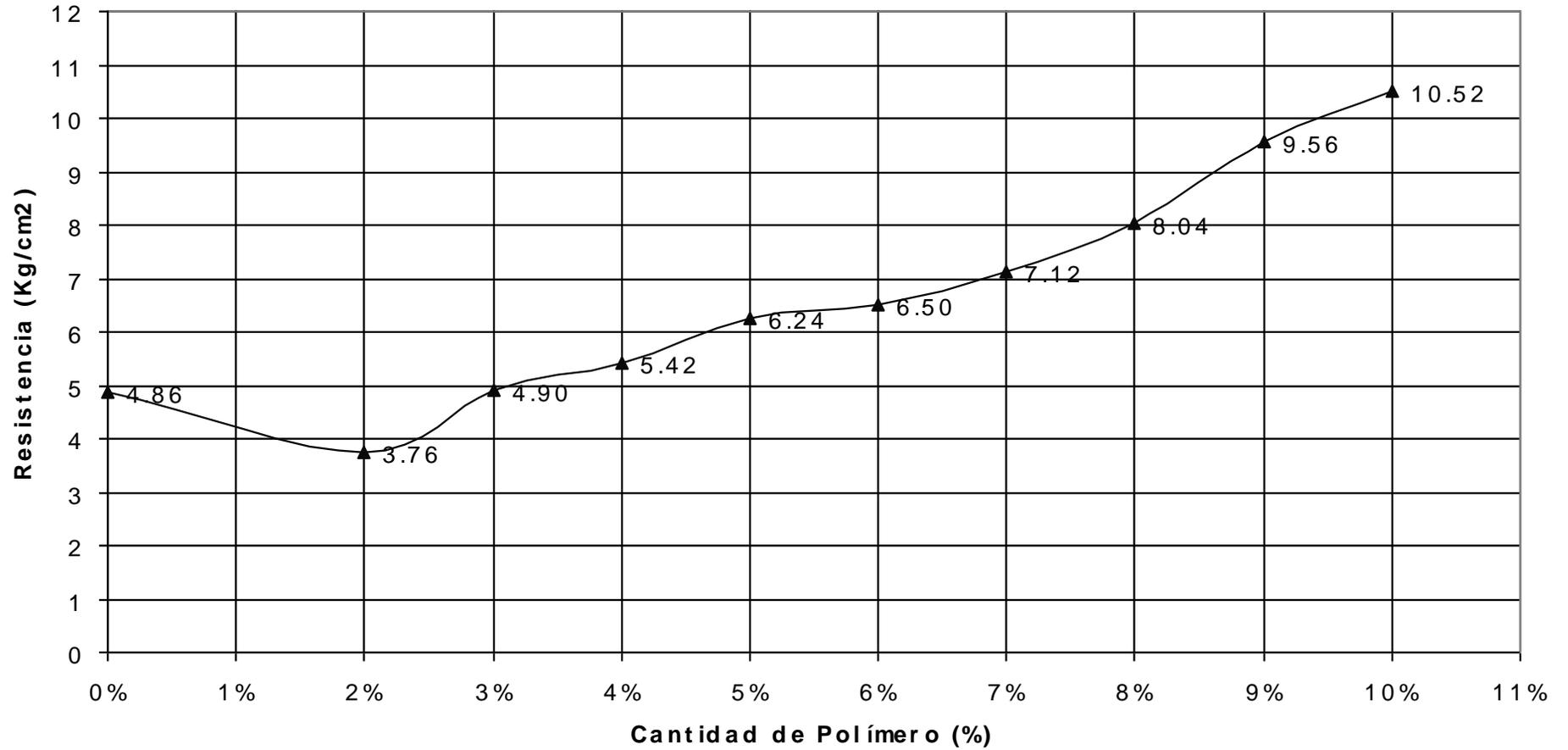
	2 % Polímero		3 % Polímero		4 % Polímero		5 % Polímero		6 % Polímero		7 % Polímero		8 % Polímero		9 % Polímero		10 % Polímero	
Peso Suelo Húmedo + Recipiente	63.96	60.18	60.38	50.57	63.11	61.46	61.57	66.48	57.67	54.80	55.29	60.64	55.39	47.01	60.64	59.64	69.83	64.80
Peso Suelo Seco + Recipiente	53.51	49.44	50.47	41.85	52.00	51.37	50.80	54.34	47.67	46.84	45.70	50.15	46.65	39.05	49.58	49.58	57.95	52.90
Peso Recipiente	16.17	13.23	15.65	11.58	13.03	15.85	13.64	12.50	16.40	16.90	12.17	12.56	15.86	11.30	13.05	13.05	16.18	12.21
Humedad Real (%)	27.99	29.66	28.46	28.81	28.51	28.41	28.98	29.02	31.98	26.59	28.60	27.91	28.39	28.68	30.28	27.54	28.44	29.25
Humedad Promedio	28.82%		28.63%		28.46%		29.00%		29.28%		28.25%		28.54%		28.91%		28.84%	
Humedad Optima	30.00%																	
Desviación Estándar	0.59%		0.68%		0.77%		0.50%		0.36%		0.87%		0.73%		0.55%		0.58%	

Suelo Amarillo # 2

	2 % Polímero		3 % Polímero		4 % Polímero		5 % Polímero		6 % Polímero		7 % Polímero		8 % Polímero		9 % Polímero		10 % Polímero	
Peso Suelo Húmedo + Recipiente	51.20	52.60	50.43	50.84	59.60	44.87	50.68	56.32	55.67	54.66	54.29	59.64	54.39	46.01	59.64	54.66	68.83	63.80
Peso Suelo Seco + Recipiente	38.20	39.50	38.79	38.69	43.89	34.80	38.49	42.62	41.98	41.46	42.50	44.50	41.20	41.30	56.01	42.30	62.50	53.05
Peso Recipiente	12.10	12.80	15.50	12.97	13.40	13.32	13.90	13.80	14.56	14.77	18.56	12.80	14.50	31.80	48.60	17.50	49.00	30.60
Humedad Real (%)	49.81	49.06	49.98	47.24	51.53	46.88	49.57	47.54	49.93	49.46	49.25	47.76	49.40	49.58	48.99	49.84	46.89	47.88
Humedad Promedio	49.44%		48.61%		49.20%		48.55%		49.69%		48.50%		49.49%		49.41%		47.39%	
Humedad Optima	49.00%																	
Desviación Estándar	0.22%		0.20%		0.10%		0.22%		0.35%		0.25%		0.24%		0.21%		0.81%	

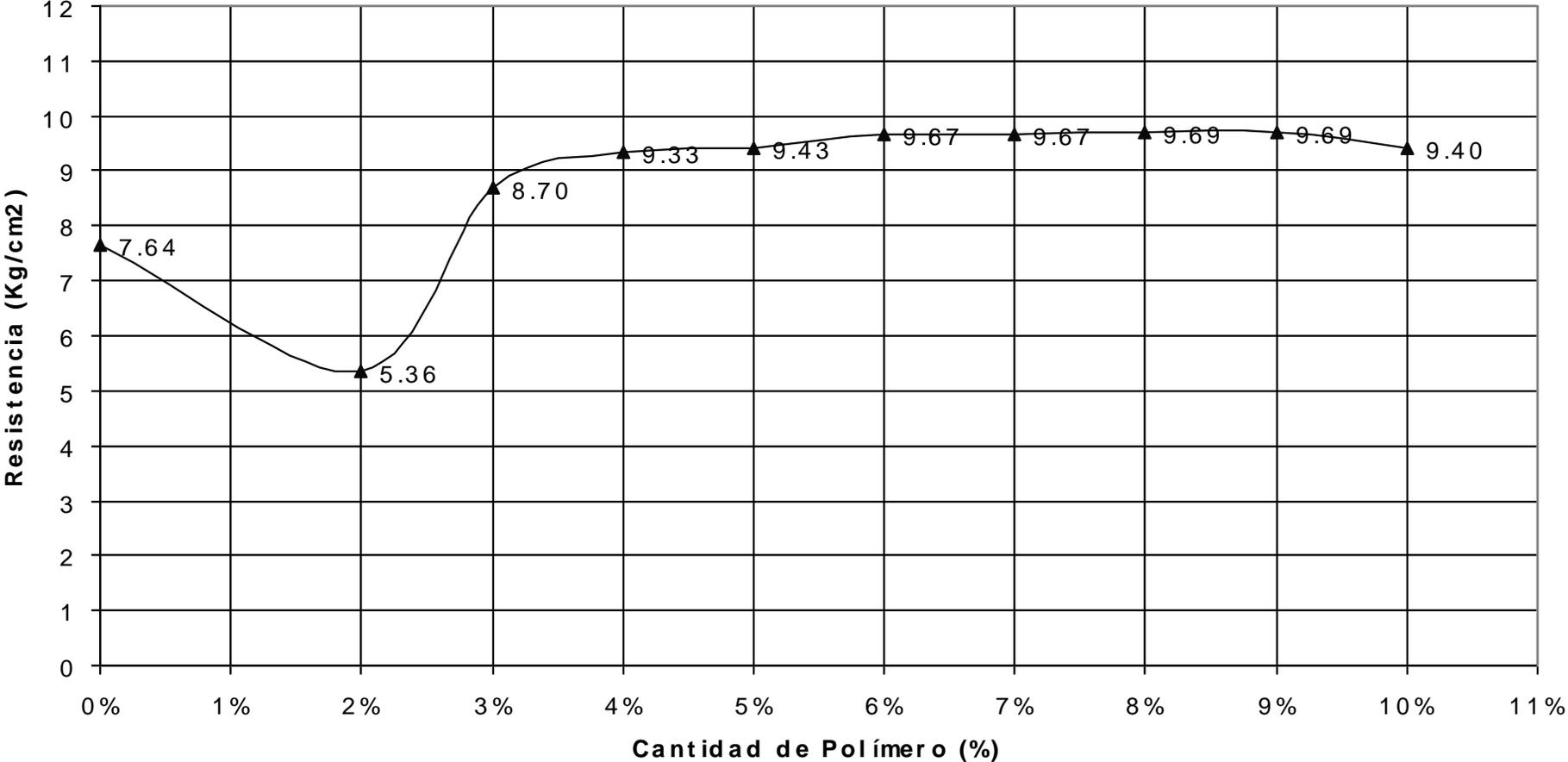
Anexo 2. Tendencia de la resistencia respecto de las variaciones de Polímero. Suelo Rosado #1.

Resistencia Vs Cantidad de Polímero
Suelo Rosado # 1



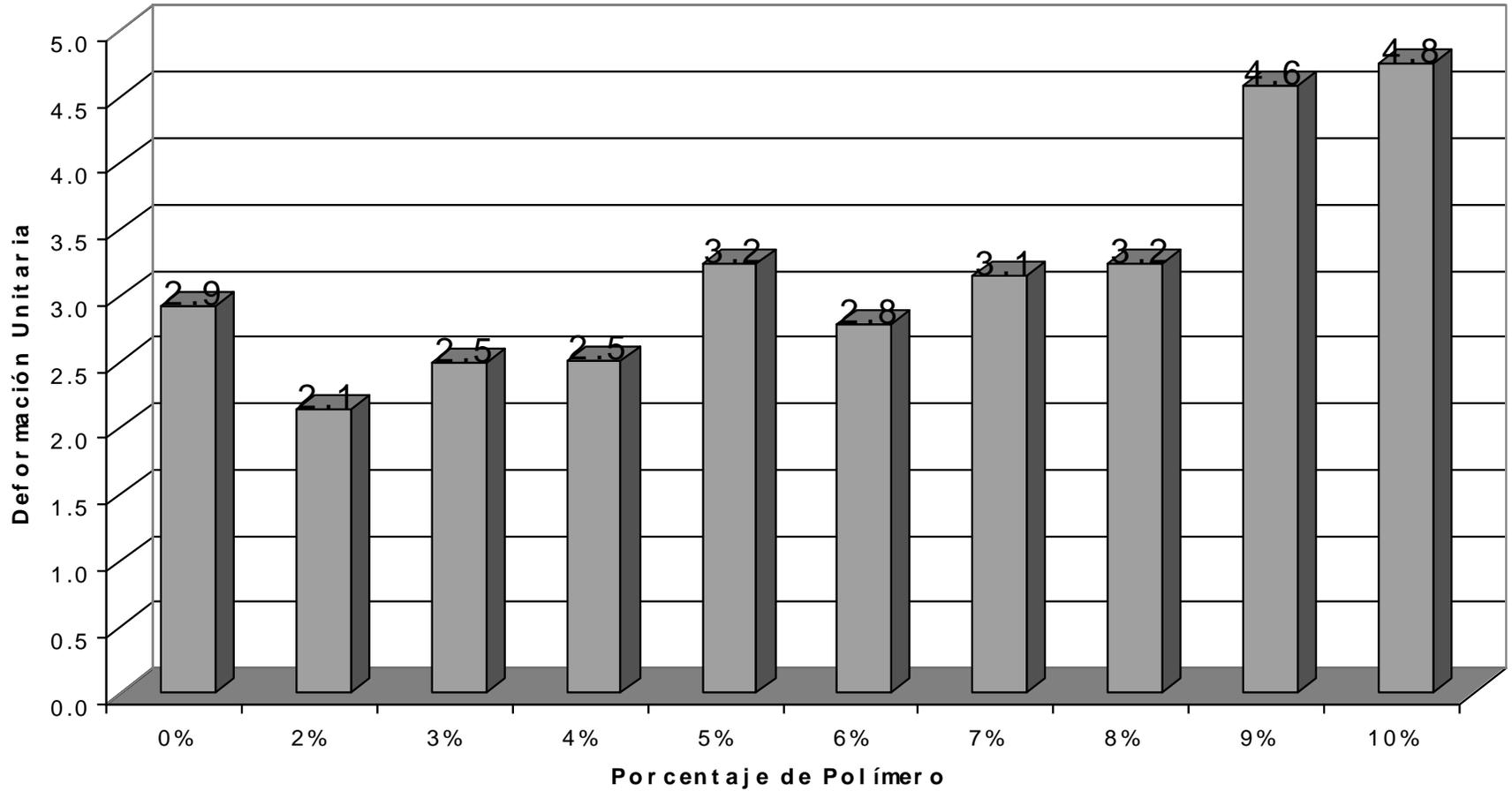
Anexo 3. Tendencia de la resistencia respecto de las variaciones de Polímero. Suelo Amarillo #2.

Resistencia Vs Cantidad de Polímero
Suelo Amarillo # 2



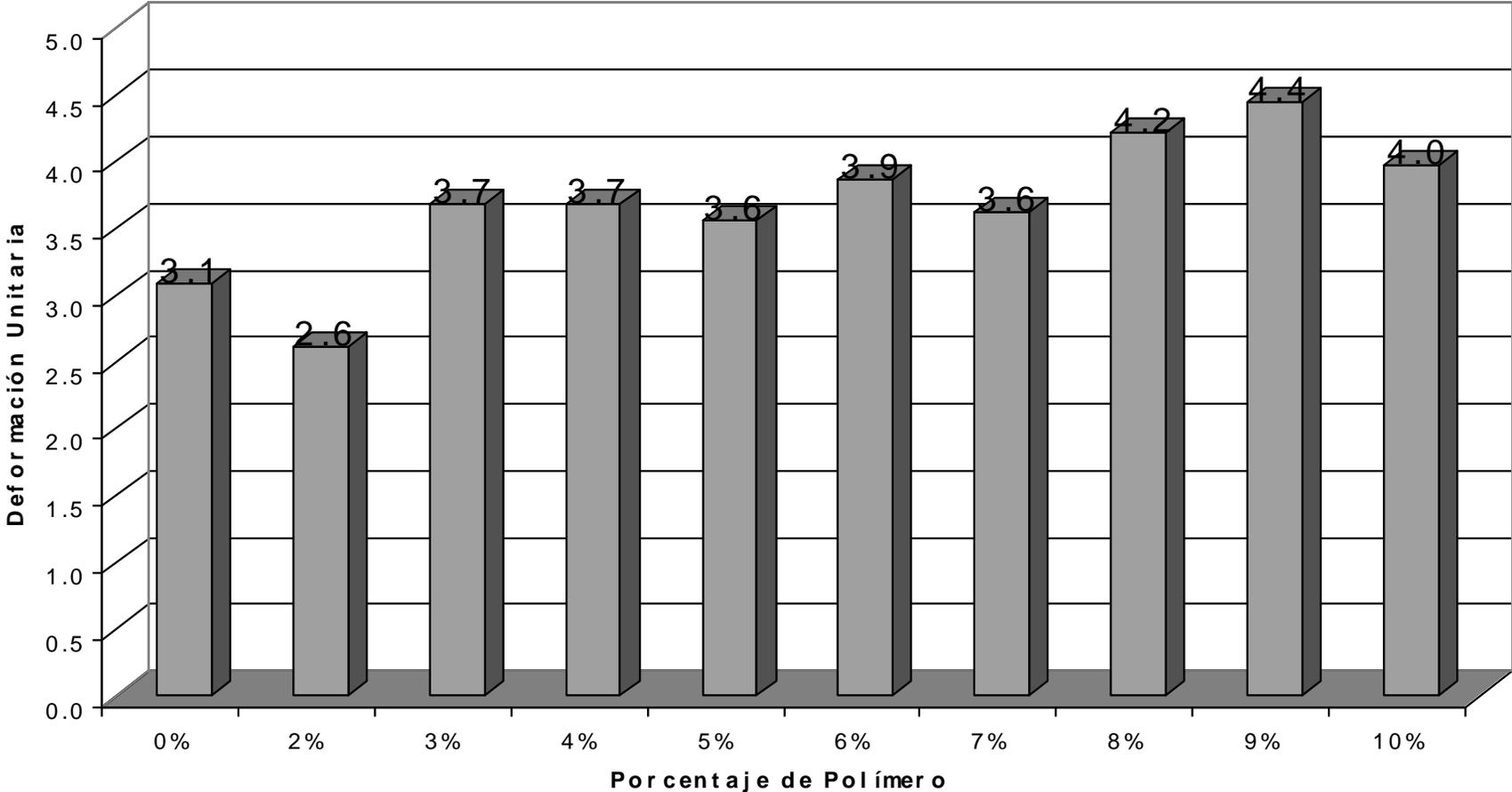
Anexo 4. Tendencia de la deformación unitaria en la falla respecto de las variaciones de Polímero. Suelo Rosado #1.

**Deformación Unitaria En La Falla
Suelo Rosado # 1**



Anexo 5. Tendencia de la deformación unitaria en la falla respecto de las variaciones de Polímero. Suelo Amarillo #2.

**Def or mación Unitaria En La Falla
Suelo amarillo #2**



Anexo 6. Resultados de los Ensayos de Compresión Simple Inconfinada