

**ESTABIIZACION FÍSICO-QUIMICA DE SUELOS FINOS PARA
SUBRASANTES DE VIAS RURALES**

**FABIO ALBERTO ROJAS ESPARZA
ALEXANDER CAMARGO SANCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FISICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2004**

**ESTABIIZACION FÍSICO-QUIMICA DE SUELOS FINOS PARA
SUBRASANTES DE VIAS RURALES**

**FABIO ALBERTO ROJAS ESPARZA
ALEXANDER CAMARGO SANCHEZ**

PROYECTO DE INVESTIGACION

**DIRECTOR: JHON WILSON CORREA AVELLO
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FISICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2004**

**A mi familia, amigos y compañeros,
Claudia Patricia y Gloria Piedad mis hermanas,
y con especial reconocimiento a mi madre, ROSALBA,
por apoyarme siempre.**

FABIO ALBERTO ROJAS ESPARZA

A mi familia y a mis amigos que durante el transcurso de mi vida, me brindaron el apoyo, el cariño, la confianza y la formación personal para crecer como persona y desarrollar actitudes para poder alcanzar esta meta. A Amanda en especial le doy mil gracias porque sus detalles y cariño facilitaron a solucionar etapas duras de mi vida profesional y personal y a Dios porque es el que siempre me acompaña.

**ALEXANDER CAMARGO SANCHEZ
AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

CORASFALTOS. Corporación que nos Brindo los medios para realizar la investigación y propietaria de la metodología de laboratorio y de campo presentada a lo largo del proyecto.

JOHN WILSON CORREA AVELLO. Ingeniero Civil y Director de la investigación.

LEONEL HERNANDEZ. Ingeniero Químico, y Jefe de Laboratorio de CORASFALTOS, por su colaboración y apoyo a lo largo de la investigación.

SERGIO CIFUENTES. Ingeniero Civil, por su colaboración, apoyo y asesoría a lo largo de la investigación.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este proyecto

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>INTRODUCCION</u>	21
1. <u>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</u>	23
1.1 <u>OBJETIVOS</u>	23
1.1.1 Objetivo General	23
1.1.2. Objetivos específicos	23
2. <u>INFRAESTRUCTURA VIAL</u>	24
3. <u>ESTABILIZACIÓN DE SUELOS</u>	32
3.1 <u>GENERALIDADES</u>	32
3.2 <u>PROPIEDADES DE INTERES EN ESTABILIZACION</u>	
DE SUELOS	33
3.2.1 Estabilidad volumétrica	34
3.2.2 Resistencia	35
3.2.3 Permeabilidad	36
3.2.4 Compresibilidad	36
3.2.5 Durabilidad	36
3.3 <u>SISTEMAS DE ESTABILIZACION</u>	37
3.3.1 Estabilizacion de suelos con cemento	37
3.3.2 Estabilización de suelos con cal	39
3.3.3 Estabilización con asfalto	42
3.3.4 Estabilización con ácido fosfórico y fosfatos	43
3.3.5 Estabilización con cloruro de sodio	43
3.3.6 Estabilización con sulfatos de calcio (yeso) y cloruros de calcio	44
3.3.7 Estabilización con hidróxido de sodio (soda cáustica)	44
3.3.8 Estabilización con resinas y polímeros	45

4.	<u>ARCILLAS</u>	46
4.1	<u>ORIGEN DE LOS SILICATOS</u>	46
4.2	<u>DEFINICION</u>	48
4.3	<u>ESTRUCTURA DE LOS MINERALES DE ARCILLA</u>	49
4.3.1	Minerales de arcilla comunes	54
4.4	<u>PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS</u>	57
4.4.1	Superficie específica	58
4.4.2	Capacidad de Intercambio catiónico	58
4.4.3	Capacidad de absorción	59
4.4.4	Hidratación e hinchamiento	60
4.4.5	Plasticidad	61
4.4.6	Tixotropía	62
4.4.7	Relaciones arcilla – agua	62
4.5	<u>IDENTIFICACION DE MINERALES DE ARCILLAS</u>	64
4.5.1	Difracción de rayos X	64
4.5.2	Análisis termodiferencial	65
4.5.3	Capacidad de intercambio cationico	65
4.5.4	Microscopio electrónico	66
4.5.5	Métodos ópticos	66
4.5.6	Métodos químicos	66
4.6	<u>APLICACIONES</u>	66
5.	<u>METODOLOGIA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACION</u>	68
5.1	<u>PRESENTACION DEL PROYECTO</u>	71
5.2	<u>PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE TRABAJO DE CAMPO</u>	71
5.2.1	Medida de la deflexión y determinación de la curvatura empleando la viga benkelman.	71
5.2.2	Relación de soporte del suelo en el terreno mediante la penetración dinámica de cono.	71

5.2.3	Toma de muestras	72
5.3	<u>PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE TRABAJO DE LABORATORIO</u>	72
5.3.1	Caracterización física inicial	72
5.3.1.1	Preparación de muestras de suelos por cuarteo	72
5.3.1.2	Determinación del contenido de agua (humedad)	72
5.3.1.3	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos	73
5.3.1.4	Determinación del límite líquido de los suelos	73
5.3.1.5	Límite plástico e índice de plasticidad	73
5.3.1.6	Determinación del peso específico	74
5.3.1.7	Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos	74
5.3.1.8	Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio)	75
5.3.2	Caracterización química	75
5.3.2.1	Análisis por difracción de RAYOS X	75
5.3.2.2	Absorción atómica	76
5.3.2.3	Determinación del grado de acidez del suelo	76
5.3.2.4	Contenido de materia orgánica	76
5.3.2.5	Determinación capacidad de intercambio catiónico (CIC)	77
5.3.2.6	Contenido de sulfatos	77
5.3.2.7	Aluminio intercambiable (o extractable)	77
5.4	<u>PRESENTACION DE RESULTADOS DE CAMPO</u>	78
5.4.1	Viga benkelman	78
5.4.2	Abcisado para apiques, toma de muestras y resultado de la prueba de cono dinámico	80
5.5	<u>PRESENTACION DE RESULTADOS DE LABORATORIO</u>	84
5.5.1	Caracterización física inicial	84
5.5.2	Caracterización química	87

5.5.2.1	Análisis por DRX	88
5.5.2.2	Absorción atómica	90
5.5.2.3	Análisis complementarios	91
5.6	<u>FORMULACION QUIMICA</u>	93
5.7	<u>ESTABILIZACION QUIMICA</u>	94
5.8	<u>EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD PARA LAS MUESTRAS ESTABILIZADAS</u>	95
5.8.1	Graficas variación índice de plasticidad con diversos productos químicos	97
5.9	<u>CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MUESTRAS ESTABILIZADAS RESPECTO A LA CAPACIDAD PORTANTE</u>	107
5.10	<u>COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS MUESTRAS NO ESTABILIZADAS Y ESTABILIZADAS</u>	109
5.11	<u>DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO POR TRAMOS HOMOGÉNEOS</u>	110
5.12	<u>DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA ESTABILIZACION</u>	111
5.12.1	Estudio de transito	112
5.12.2	Diseño de la estructura en el software Depav	113
5.13	<u>PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO</u>	115
5.13.1	Escarificación del material de subrasante natural	115
5.13.2	Extendido del material	117
5.13.3	Ubicación y aplicación del aditivo estabilizador	117
5.13.4	Mezclado del suelo con el aditivo previamente extendido	119
5.13.5	Adición del contenido de agua	121
5.13.6	Mezclado de material	122
5.13.7	Compactación de la capa en franjas	123
5.13.8	Control del proceso	124
5.13.9	Colocación de una superficie protectora	125

5.13.10	Curado	126
5.13.11	Comparación del aspecto inicial y final de la construcción de la vía	126
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	127
7.	<u>RECOMENDACIONES</u>	131
8.	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	132

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Infraestructura vial nacional	27
Tabla 2. Carreteras construidas por países	28
Tabla 3. Propiedades de la cal	40
Tabla 4. Minerales de arcillas comunes	54
Tabla 5. Resultados viga Benkelman	78
Tabla 6. Relación muestra abscisa	80
Tabla 7. Relación abscisa, CBR y modulo subrrasante	82
Tabla 8. Caracterización física inicial del suelo de la vía	85
Tabla 9. Muestras seleccionadas y determinación del peso específico	87
Tabla10. Análisis químicos complementarios	91
Tabla11. Relación aditivos costos	94
Tabla12. Variación de plasticidad de los suelos en el tiempo	96
Tabla13. Aditivo que mejor disminuye el IP	107
Tabla14. CBR en las muestras estabilizadas	108
Tabla15. Comparación de las muestras	109
Tabla16. Dosificación del aditivo	110
Tabla17. Conteo de vehículos	112
Tabla18. Factores de equivalencia	112
Tabla19. Relación abscisa y modulo elástico	113
Tabla20. Relación abscisa y espesor de capa	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Coordinación tetraédrica	52
Figura 2. Coordinación octaédrica	53
Figura 3. Caolinita	53
Figura 4. Mica	54
Figura 5. Deflexiones Benkelman elástica recuperable	79
Figura 6. Deflexiones Benkelman radio de curvatura	80

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Variación de plasticidad Abs K0+120	97
Grafica 2. Variación de plasticidad Abs K6+920	97
Grafica 3. Variación de plasticidad Abs K7+080	98
Grafica 4. Variación de plasticidad Abs K8+640	98
Grafica 5. Variación de plasticidad Abs K10+880	99
Grafica 6. Variación de plasticidad Abs K12+920	99
Grafica 7. Variación de plasticidad Abs K14+240	100
Grafica 8. Variación de plasticidad Abs K15+160	100
Grafica 9. Variación de plasticidad Abs K15+760	101
Grafica 10. Variación de plasticidad Abs K16+960	101
Grafica 11. Variación de plasticidad Abs K19+400	102
Grafica 12. Variación de plasticidad Abs K19+960	102
Grafica 13. Variación de plasticidad Abs K21+200	103
Grafica 14. Variación de plasticidad Abs K22+120	103
Grafica 15. Variación de plasticidad Abs K23+280	104
Grafica 16. Variación de plasticidad Abs K23+720	104
Grafica 17. Variación de plasticidad Abs K24+200	105
Grafica 18. Variación de plasticidad Abs K25+920	105
Grafica 19. Variación de plasticidad Abs K26+320	106

LISTA DE FOTOS

		Pág.
Foto 1.	Aspecto inicial de la vía	115
Foto 2.	Escarificación con motoniveladora	116
Foto 3.	Escarificación con retroexcavadora	116
Foto 4.	Extendido del material	117
Foto 5.	Ubicación y aplicación del aditivo estabilizador fase1	118
Foto 6.	Ubicación y aplicación del aditivo estabilizador fase 2	118
Foto 7.	Mezclado del suelo con el aditivo fase 1	119
Foto 8.	Mezclado del suelo con el aditivo fase 2	119
Foto 9.	Mezclado del suelo con el aditivo fase 3	120
Foto10.	Mezclado del suelo con el aditivo fase 4	120
Foto11.	Adición del contenido de agua empleando tanque irrigador fase1	121
Foto12.	Adición del contenido de agua empleando tanque irrigador fase2	121
Foto13.	Mezclado de material empleando motoniveladora fase 1	122
Foto14.	Mezclado de material empleando motoniveladora fase 2	123
Foto15.	Mezclado de material empleando motoniveladora fase 3	123
Foto16.	Compactación de la capa en franjas empleando vibrocompactador fase 1	123

Foto17.	Compactación de la capa en franjas empleando vibrocompactador fase 2	124
Foto18.	Medición de densidades con ensayos de campo.	124
Foto19.	Imprimación	125
Foto 20.	Slurry-seal	125
Foto 21.	Aspecto inicial de la vía	126
Foto 22.	Aspecto final de la vía	126

**TITULO*: ESTABIIZACION FÍSICO-QUIMICA DE SUELOS FINOS PARA
SUBRASANTES DE VIAS RURALES**

**AUTOR(ES): FABIO ALBERTO ROJAS ESPARZA
ALEXANDER CAMARGO SANCHEZ****

PALABRAS CLAVES: Crisis vial, estabilización, suelos finos, caracterización físico y química, agentes químicos, índice de plasticidad, capacidad portante.

DESCRIPCIÓN:

La crisis vial Colombiana demanda alternativas para superar esta situación y este proyecto se presenta con una opción para satisfacer necesidades sociales desde una perspectiva rural.

Colombia vive un subdesarrollo local y global, a nivel local las carreteras en términos físicos han evolucionado muy por debajo del producto nacional y las exportaciones; a nivel global se presenta a Colombia como uno de los países más atrasados del mundo donde el número de kilómetros asfaltados por el país son inferiores a los del promedio de África , solo son comparables a los de Bolivia y Perú, corresponden a la tercera parte de México y Venezuela, y no llegan a la mitad del promedio de la región, por tanto este proyecto se presenta como alternativa de solución para el mejoramiento de la malla vial a nivel rural.

Este proyecto se basa en la presentación de un trabajo vial a través de una metodología en la que sus muestras representativas resultantes de un trabajo de campo son caracterizadas físicas y químicamente , después se presenta la formulación de agentes químicos para mejorar su comportamiento estructural seguido por el procedimiento para la estabilización y evaluación de las propiedades a mejorar como lo son el índice de plasticidad, capacidad portante, luego se presenta un diseño de la estructura vial a conformar y finaliza con el procedimiento constructivo.

Respecto a la caracterización física y química del material se encontró que las muestras estudiadas pertenecen a los grupos SC, SM, CL, CH, con índice de plasticidad entre 0% y 47%, con una capacidad estructural de magnitud media a baja con presencia de componentes mineralógicos que le confieren propiedades expansivas. Respecto a la evaluación de los agentes químicos el más eficaz fue la cal viva la cual redujo los índices de plasticidad a menos de 9% con capacidad de soporte alta y por ultimo el diseño estructural y procedimiento constructivo se basa en el suelo estabilizado con este agente químico.

La metodología de laboratorio y de campo presentada a lo largo del proyecto es propiedad de Corasfaltos.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, ingeniería Civil, Ing.Jhon W.Correa A.

TITLE*: PHYSICAL AND CHEMICAL STABILIZATION OF FINE SOILS
FOR SUBGRADES OF RURAL ROADS.

AUTHORS: FABIO ALBERTO ROJAS ESPARZA
ALEXANDER CAMARGO SANCHEZ**

KEYWORDS: Road crisis, stabilization, fine soils, physical and chemical characterization, chemical agents, plasticity index, bearing capacity.

ABSTRACT

Colombia's road crisis demands alternatives to overcome this situation and this project is presented as an option to satisfy social needs from a rural perspective.

Colombia lives a road underdevelopment locally and globally, in a local ambit the roads in physical terms have evolved very under the national product and exports, in a global ambit Colombia is presented as a country that lags behind regarding the road infrastructure where the number of asphalted kilometers per inhabitant are lower than the average number of Africa's, only are comparable to those of Bolivia's and Peru's, corresponds to the third part of Mexico's and Venezuela's, and do not reach half of the average number of the region's, therefore this project is presented as an alternative solution for the improvement of the road structure in a rural level.

This project is based on the presentation of a road work through a methodology in which its representative samples resulting from a field work are characterized physically and chemically, then a formulation of chemical agents is presented to improve their structural behavior, followed by the

procedure for stabilization and evaluation of properties to be improved such as plasticity index and bearing capacity, then a design of the road structure is presented and finally it ends with the constructive procedure.

Regarding the physical and chemical characterization of the material, it was found that the studied samples belong to the SC, SM, CL, CH groups with plasticity index between 0% and 47%, with a structural capacity from medium to low magnitude with presence of mineralogical components which give the material expansive properties. About the evaluation of the chemical agents the most positive acting agent was the quicklime which reduced the plasticity index below 9% with high bearing capacity and finally the structural design and constructive procedure are based on the stabilized soil with this chemical agent.

The Laboratory and field methodology presented in this project is property of Corasfaltos.

* Degree proyect.

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering,Civil Engineering,Ing.Jhon W.Correa A.

INTRODUCCION

La infraestructura vial es uno de los parámetros que permite la dinámica del crecimiento en el orden económico, social, político y cultural, es así que en el área económica las vías integran las zonas de producción con las zonas de demanda, en el área social la comunidad se ve favorecida a acceder a derechos básicos como la educación, salud, trabajo, en el área político donde el gobierno hace presencia para ejercer autoridad y justicia y en el área cultural donde la idiosincrasia de la sociedad se desarrolla en conjunto con la integración de comunidades vecinas.

Colombia vive un subdesarrollo vial local y global, donde las carreteras en términos físicos han evolucionado muy por debajo del producto nacional y las exportaciones y aun son más dicientes las comparaciones internacionales que presentan a Colombia como uno de los países más atrasados del mundo en infraestructura vial donde el número de kilómetros asfaltados por habitante del país son inferiores a los del promedio de África, sólo son comparables a los de Bolivia y Perú, corresponden a la tercera parte de México y Venezuela y no llegan a la mitad del promedio de la región.

Este proyecto se presenta con el objeto de ofrecer una alternativa de solución al atraso vial por medio de la estabilización física y química de suelos finos para subrasantes de vías rurales ya que este proceso ofrece ventajas de tipo económico, facilidad de construcción y agilidad en el tiempo de puesta en servicio, este proceso se fundamenta en estabilizar suelos arcilloso por adición de agentes químicos obteniendo una estructura de suelo con buen comportamiento estructural.

A continuación se enfoca este proyecto iniciando con un marco teórico donde se revisara la infraestructura vial nacional, las diferentes clases de estabilización y aspectos generales sobre las arcillas, luego se presenta un marco empírico por medio de la presentación de un proyecto vial a través de sus muestras representativas con sus respectivas caracterizaciones físicas y químicas, con la formulación de agentes químicos para constituir un material de pobres características estructurales a otro con atributos más aptos para la construcción de subrasantes estabilizadas para vías rurales

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Estabilizar física y químicamente suelos finos para mejorar sus propiedades estructurales, haciéndolas mas aptas para la construcción de subrasantes de vías rurales.

1.1.2. Objetivos específicos

- ❖ Caracterizar físicamente los suelos para conocer su clasificación granulométrica, su comportamiento frente al agua, su capacidad portante y determinar su competencia en la conformación de una subrasante de una vía rural.
- ❖ Caracterizar químicamente los suelos que mediante la caracterización física no mostraron un comportamiento viable en la conformación de la subrasante de una vía, determinando su composición mineralógica, acidez, materia orgánica, intercambio catiónico, contenido de sulfatos, para comprender su comportamiento químico.
- ❖ Buscar agentes químicos con base en la caracterización físico-química de los suelos no competentes para hacerlos útiles en la conformación de una subrasante de adecuadas propiedades físico-mecánicas
- ❖ Evaluar cuantitativamente el efecto que producen los agentes químicos en las propiedades de plasticidad, resistencia y expansibilidad.
- ❖ Plantear el procedimiento constructivo de la capa a estabilizar química y mecánicamente en la conformación de la subrasante de la vía rural.

2. INFRAESTRUCTURA VIAL

Trasporte y desarrollo

La importancia del transporte y en especial de la red vial en el desarrollo económico esta en su capacidad de integración. Las empresas industriales y comerciales están expuestas a externalidades que dan lugar a que los avances de una de ellas se trasladen a otras. Además, las firmas productoras de materias primas tienden a ubicarse cerca de las empresas de bienes finales y estas cerca a las de materia prima. Así la concentración industrial da lugar a externalidades positivas, en el sentido en que la entrada de nuevas empresas contribuye a aumentar la productividad de las existentes. Ese comportamiento se ve confirmado en los estudios empíricos en los que se observa que las empresas tienden a situarse en reducidos cinturones. En un principio las unidades productivas prefieren los lugares en donde existe la demanda y posteriormente aquellas donde se encuentran las otras empresas.

El transporte juega un papel central en este proceso de rendimiento creciente. Si los costos de transporte son altos, las empresas preferirán establecerse en lugares donde existe la demanda. La producción tendera a atomizarse en unidades pequeñas destinadas a los mercados locales, perdiendo las ventajas de la demanda ampliada. En este sentido, el desarrollo de actividades con grandes economías de escala esta condicionado a la disponibilidad de un amplio sistema vial. Lo anterior tiene efectos importantes en el desarrollo del comercio internacional.

En los últimos años, se ha acumulado una amplia evidencia según los flujos de comercio industrial están más determinados por las economías de escala que por la proporción de los factores de producción. Las ventajas del comercio están a favor de los productos que puede elaborarse en mayores escalas. Del mismo modo, los mayores beneficios favorecen a los países que poseen mayores mercados, ya sea porque gozan de ingresos más altos o de mejores sistemas de transportes. No es aventurado afirmar que esos países ofrecen las mejores posibilidades de entrar en las actividades de alta tecnología que se caracteriza por economías de gran escala. Por eso, los mayores volúmenes de comercio industrial de América latina se encuentran en Argentina, Brasil y México.

Tal comportamiento plantea dudas sobre el G3, donde México y Venezuela disponen de mercados mayores que Colombia y cuentan con sistemas viales mucho más avanzados. Colombia que está abocada a una clara desventaja en los sectores de complejidad tecnológica, tenderá a especializarse en actividades de alto costo de transporte, como la producción de materiales de construcción y las operaciones de ensamble.

Subdesarrollo vial colombiano

La infraestructura de Colombia no ha evolucionado paralelamente con su desarrollo. En la tabla N. 1 se observa que la red nacional en kilómetros creció desde 1962 a 1990 a razón de 1.7%. Así, las carreteras en términos físicos han evolucionado muy por debajo del producto nacional y las exportaciones. Aun más dicientes son las comparaciones internacionales. Colombia aparece como uno de los países más atrasados del mundo en infraestructura vial. En la tabla N.2 se observa que los kilómetros asfaltados por habitante del país son inferiores a los del promedio de África, solo son comparables a los de Bolivia y Perú, corresponden a la tercera parte de la de

nuestros socios del G3 México y Venezuela, y no llegan a la mitad del promedio de la región.

El panorama descrito es el resultado de las deficiencias que se han acumulado durante tres décadas, periodo en que se configura una monumental brecha entre el tamaño del país y la infraestructura física. Lo grave es que las condiciones se han venido agravando con el tiempo, en el periodo de la apertura económica, tan solo se construyeron mil kilómetros de carreteras, si se mantiene esta baja dinámica de construcción vial se requerirá 70 años para alcanzar el nivel promedio de América latina y 120 para alcanzar a nuestros socios del G3.

TABLA 1. Infraestructura vial nacional

INFRAESTRUCTURA VIAL NACIONAL			
AÑO	RED VIAL NACIONAL Km	POBLACION TOTAL	PIB \$MM
1962	16.512	16.292.014	204.630
1963	16.692	16.875.460	211.355
1964	17.054	17.484.509	224.389
1965	17.479	17.993.946	232.467
1966	17.825	18.523.127	244.915
1967	17.997	19.072.953	255.211
1968	18.842	19.644.373	270.830
1969	19.267	20.238.381	288.073
1970	19.915	20.856.027	307.496
1971	20.017	21.498.414	325.825
1972	20.276	22.166.704	350.813
1973	20.408	22.862.118	374.398
1974	20.843	23.233.851	395.910
1975	21.264	23.613.157	405.108
1976	21.838	24.000.225	424.263
1977	22.268	24.395.248	441.906
1978	22.552	24.798.426	479.335
1979	22.757	25.209.965	505.119
1980	22.917	25.630.080	525.765
1981	23.373	26.058.993	537.736
1982	23.820	26.496.932	542.836
1983	24.472	26.944.134	551.380
1984	25.250	27.400.847	569.855
1985	25.582	27.867.326	587.561
1986	25.966	28.741.952	621.781
1987	25.951	29.649.814	655.164
1988	25.418	30.592.435	681.791
1989	25.657	31.571.420	705.068
1990	26.517	32.588.462	735.259

	1962-1990	1962-1991	1962-1992
Crecimiento Promedio %	1,71	2,51	4,67
	1962-1990	1962-1991	1962-1992
Crecimiento Promedio %	60,59	100,03	259,31

TABLA 2. Carreteras construidas por países

CARRETERAS CONSTRUIDAS POR PAISES		
País	Carreteras Km por millón de persona 1992	PIB per capita dólares 1993
BANGLADESH	59	220
UGANDA	118	180
BOLIVIA	258	760
MOZANBIQUE	343	90
PERU	347	1490
NIGERIA	376	300
COLOMBIA	383	1400
ECUADOR	476	1200
SRI LANKA	536	600
EGIPTO	633	660
ZAMBIA	795	380
CHILE	808	3170
PAKISTAN	826	430
TAILANDIA	841	2110
INDIA	893	300
BRASIL	929	2930
SINGAPUR	993	19850
MEXICO	1019	3610
COREA REP.	1090	7660
ZIMBABWE	1406	520
ARGENTINA	1856	7220
URUGUAY	2106	3830
ALGERIA	2403	1780
TURQUIA	5514	2970
REINO UNIDO	6224	18060
JAPON	6426	31490
ESPAÑA	8540	13590
VENEZUELA	10269	2840
FRANCIA	13008	22490
ESTADOS UNIDOS	14453	24740

Por tanto las vías de comunicación son uno de los factores más importantes en el progreso y desarrollo de toda región, específicamente en países como Colombia en las que las actividades agrícolas, ganaderas, mineras y turísticas son la base de la economía nacional, las vías son el medio para que estas actividades se desarrollen y puedan crecer, dependiendo del número, de las condiciones existentes o de la construcción de vías que se produzcan en aquellas zonas apartadas de centros de producción y consumo.

En Colombia en el año 2003 hubo un incremento del 7.45% en el número de vehículos que circularon por las carreteras con relación al año 2002. (reporte según INVIAS), sin embargo un informe (INVIAS) señala que 32 millones de vehículos livianos rodaron por la red vial nacional en el 2003, es decir 2.5 millones más que en el 2002 y que en total el tráfico por las carreteras colombianas se incrementó en casi 4.000.000 de vehículos de todo tipo.

En cuanto al transporte de carga y pasajeros, el INVIAS señala que se presentó un aumento en casi dos millones en el número de buses y camiones que rodaron por las carreteras del país mientras en el 2002 se consideran que transitaban 25.000.000 de este tipo de vehículos; en el 2003 este número ascendió a 26.500.000.

De lo anterior se nota el gran número de vehículos que transitan por las diferentes vías del país, y es de saber que estos vehículos tienen finalidades y objetivos específicos en su transporte u operaciones, generando diferentes beneficios en diferentes campos, como económicos, políticos, sociales, etc.

Los beneficios principales de tipo económico que genera el mejoramiento de las condiciones de una vía existente o con la construcción de una nueva, vienen representados por la integración de tierras, valorizando todos los terrenos que hacen parte de la zona de influencia de una manera gradual;

por la producción agregada de bienes y servicios, mediante la especialización de la economía local y porque se incentiva a otros sectores de la economía cuando se reducen los gastos de transporte (que representen en la economía nacional un alto porcentaje, debido a los bajos costos unitarios de la producción) disminuyendo el costo final de los productos.

Hay que destacar que en este contexto regional y nacional se desarrolla una evaluación general del estado de los medios de transporte terrestre y entre ellas los de las vías de comunicación, y se deduce que el bajo grado de conectividad existente a nivel intraregional en los diferentes departamentos y el deterioro de la malla vial secundaria y terciaria, constituyen las principales debilidades que afectan la competitividad en el sector productivo, dado el incremento en los costos del transporte, como también el débil crecimiento en la producción agregada de bienes y servicios.

La existencia de pocas vías o de vías inadecuadas reduce sustancialmente el desarrollo que podría tener una región a nivel industrial, en regiones ricas en recursos agrícolas e industriales al no tener el elemento de integración.

En el campo social la facilidad del transporte entre regiones abre puertas de producción, generando opciones de empleo que mejoran la calidad de vida de sus habitantes sin que estos tengan que abandonar sus tierras en búsqueda de nuevas y mejores oportunidades; así mismo se motiva la dinámica del turismo en la zona de influencia como factor de ingreso de capital para la inversión de bienes y servicios.

De esta forma con las vías llega el desarrollo económico a la región, llega la salud, la educación, la seguridad y la justicia al campesino, al niño, al anciano y a cualquier habitante que se encuentre permanente o

temporalmente en la región, así mismo es un instrumento del estado para manifestar su existencia y autoridad.

De lo anterior se ve la clara necesidad de aumentar y mejorar la malla vial colombiana para de esta manera traer consigo beneficios a la sociedad en un orden económico, social, político y cultural.

3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

3.1 GENERALIDADES

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin, en un lugar específico. Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión:

- 1 Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta realísimamente su calidad en el diseño efectuado.
- 2 Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, substituyéndolo por otro de características adecuadas.
- 3 Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir los requerimientos a los que será sometido.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. En rigor son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría en las propiedades de los suelos, con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico. La siguiente lista de tipos de procedimiento no agota seguramente el tema, aunque reúna los más comunes:

- 1 Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.
- 2 Estabilización por drenaje.
- 3 Estabilización por medios eléctricos, de los que la electrólisis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los mejor conocidos.

- 4 Estabilización por empleo de calor y calcinación.
- 5 Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte sólo aplicable a un número limitado de tipos de ellos: en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económicamente hayan de involucrarse varios tipos de suelos a veces con variaciones de alguna significación, renunciando correspondientemente al empleo del procedimiento “óptimo” en cada clase.

Desde un principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse. Sólo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelo.

3.2 PROPIEDADES DE INTERES EN ESTABILIZACION DE SUELOS

Las propiedades más frecuentemente que se estudian son: Estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, comprensibilidad, durabilidad .

Frecuentemente será posible utilizar tratamiento que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización sólo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas representan más bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de ulterior desarrollo. A continuación se insiste un poco sobre las propiedades de los suelos más susceptibles de ser mejoradas por estabilización.

3.2.1 Estabilidad volumétrica

Se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forma la gama de líneas de acción más usual.

Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos, la experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

3.2.2 Resistencia

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Pero antes de profundizar más en este aspecto será preciso decir que todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, circunstancia desafortunada, dado que, como es bien sabido muchos de los más graves problemas de falta de resistencia ocurren precisamente en suelos orgánicos. Da una idea muy precisa de la influencia del contenido de materia orgánica en los efectos de la estabilización en suelos análogos en otros conceptos.

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos, como uno de sus objetivos más comunes. El empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de la resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetros en valores razonables durante tiempos largos. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar resistencia son las siguientes:

- Compactación
- Vibroflotación
- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos.
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos.

3.2.3 Permeabilidad

No suele ser muy difícil modificar sustancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes (por ejemplo, polisfosatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En la actualidad se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, pues no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

3.2.4 Compresibilidad

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados tienen influencia en dicho concepto.

3.2.5 Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales

como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

3.3 SISTEMAS DE ESTABILIZACION

3.3.1 Estabilización de suelos con cemento

Los fenómenos químicos que ocurren entre suelo y cemento, cuando ambos se mezclan con el apropiado contenido de agua, aún no son comprendidos del todo, pero básicamente parece que consiste en reacciones de cemento con los componentes silicosos de los suelos, que producen conglomerantes que ligan a las gravas, arenas y limos; este es el efecto básico en los suelos gruesos. Además, el hidrato de calcio que se forma como consecuencia del contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio, muy ávidos de agua, que la toman de la que existe entre las laminillas de arcilla; el resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y la plasticidad del suelo arcilloso, así como el aumento en su resistencia y su durabilidad.

La reacción favorable suelo - cemento se ve muy impedida o nulificada cuando el primero contiene materia orgánica, pues los ácidos orgánicos poseen gran avidez por los iones de calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento en los suelos gruesos o la estabilización de las partículas laminares en las arcillas. Por esta razón las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en un suelo no sobrepase 1.2% en peso, si ha de ser considerado apropiado para ser estabilizado con cemento.

También es nociva la presencia en el suelo de sulfatos de calcio, de magnesio u otras sustancias ácidas, pues privan a los aglomerantes de la humedad necesaria para su función.

El Efecto del cemento en los suelos arcillosos resulta más complicado y peor comprendidos que en los suelos más gruesos, por lo que pudiera resultar conveniente detallarlo, algo más. Parece ser que en primer lugar se produce un efecto primario en el que la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos hidratados de calcio, hidróxido de calcio e iones Ca, que elevan la concentración de electrolitos del agua intersticial, aumentando su pH. Viene a continuación un proceso secundario en dos fases. En la primera se produce un intercambio iónico entre los iones calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, todo lo cual tiende a flocular a la propia arcilla. En la segunda fase, tienen lugar reacciones químicas puzolánicas entre la cal y los elementos que componen los cristales de arcilla. Los elementos silícicos, y alumínicos reaccionan con los compuestos cálcicos para formar elementos cementantes: el resultado final de esta reacción es la transformación de una estructura arcillosa originalmente floculada y vaporosa, en un agregado resistente. En esta misma segunda fase, el hidróxido de calcio que se va consumiendo puede reponerse por la cal que se libera durante el proceso primario de hidratación del cemento.

En las superficies expuestas al aire, el calcio se carbonata, con el correspondiente efecto de cementación adicional entre las partículas de arcilla.

Las arcillas montmorillonitas son, a la larga, las más reactivas ante el cemento, seguidas de las ilitas y de las caolinitas. Sin embargo, el aumento de resistencia del material ante la estabilización no demuestra seguir leyes tan sencillas y de hecho, parece acercarse más bien inversamente

proporcional a la reactividad de la arcilla.

El grado de pulverización de las arcillas se refleja en la reactividad, que aumenta con aquel; en montmorillonitas e ilitas, la incorporación previa al cemento de pequeños porcentajes de cal favorece la pulverización de la arcilla y facilita la incorporación posterior del cemento.

Prácticamente todos los tipos de cemento son útiles para estabilización de suelos y normalmente se emplean los de fraguado y resistencia normales.

Cualquier suelo que no tenga cantidades excesivas de materia orgánica puede ser tratado con cemento para mejorar su comportamiento mecánico (resistencia, etc.); las únicas limitaciones estriban en lo difícil que pueda resultar un adecuado mezclado del cemento, lo que llega a ser muy difícil en arcillas suaves y húmedas.

3.3.2 Estabilización de suelos con cal

La estabilización de suelos con cal parece ser la forma más antigua de mejoramiento de suelos. Hay evidencias que la vía Apia, acceso a la antigua Roma, se construyó utilizando estas técnicas. En términos generales la estabilización con cal hidratada son bastantes similares a las de la estabilización con cemento, pero hay dos aspectos de diferencia que conviene destacar:

1. La cal tiene un espectro de aplicación que se extiende mucho más hacia los materiales más arcillosos que el cemento y, en contrapartida, se extiende algo menos hacia el lado de los materiales granulares de naturaleza friccionante.

2. En algunos casos la estabilización con cal se usa como pretratamiento de un suelo.

La cal: la forma mas usual de la cal empleada en las estabilizaciones es la hidratada, óxidos o hidróxidos de calcio. La cal viva se usa con frecuencia en pretratamientos con suelos húmedos.

La cal se prepara generalmente calentando carbonato de calcio, muchas veces bajo la forma de calizas naturales, hasta que pierden su bióxido de carbono y devienen en óxidos de calcio; el material resultante es la cal viva ,muy inestable y ávida de agua, lo que hace difícil su manejo y almacenamiento, lo que suele hidratarse de inmediato.

Para formar la cal estabilizante no es preciso partir de calizas puras, sino que pueden tolerarse algunas impurezas. En la siguiente tabla se expresa los requisitos que suelen pedirse a la materia prima para formar la cal estabilizante.

Tabla 3. Propiedades de la cal

Propiedad	Cal Viva CaO	Cal hidratada Ca(OH)₂
Óxidos de calcio Magnesio	No menos de 92%	No menos de 95%
Bióxidos de carbono en el horno	No mas de 3%	No mas de 5%
Fuera del horno	No mas de 10%	No mas de 7%

Reacciones: El efecto básico de la cal es la constitución de silicatos de calcio que se forman por acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar los compuestos cementantes.

Hay dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo:

1. Una reacción que es inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas del suelo, lo que deprime su doble capa, a causa del incremento en la concentración de cationes en el agua; a la vez ocurre otro efecto que tiende a expandir la doble capa por el alto pH de la cal.

2. Una reacción que tiene lugar a lo largo de lapsos considerables y es la reacción propiamente cementante, se le atribuye a una interrelación entre los iones calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos.

La reacción cementante tiene lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente del tipo de suelo que en ella intervenga; en esto, la estabilización con cal difiere mucho a la estabilización con cemento.

Propiedades: La cal tiene poco efecto en suelos muy orgánicos o en suelos sin arcilla. Tiene su máximo efecto en gravas arcillosas, en las que puede producir mezclas inclusive más resistentes que las que se obtendrían con cemento. Ha tenido su utilización mas frecuente en arcillas plásticas, a las que hace, adicionalmente mas trabajables y fáciles de compactar, razón por la cual se usa frecuentemente como pretratamiento, anterior a una estabilización con cemento, además de los muchos casos en que se usa como estabilizante definitivo. El efecto de la cal en las arcillas es más rápido en las montmorillonitas que las caolinitas y en las primeras la cal logra resultados mucho más espectaculares en el aumento de la resistencia y sobre todo, en la disminución de la plasticidad. En las arcillas, la cal tiene también un importante efecto en la consecución de estabilidad volumétrica ante el agua.

En la estabilización con cal debe evitarse el uso de aguas ácidas. El agua de mar se ha usado para compactar suelo-cal con frecuencia, pero debe evitarse allí donde se vaya a colocar un riego de sello asfáltico sobre la capa tratada, pues la cristalización de las sales desprenderá el sello. La cantidad de agua que se emplee esta regida por los procedimientos de compactación, pero si se usa cal viva pudieran requerirse cantidades adicionales de agua en suelos con menos de 50% de contenido natural de dicho elemento.

Generalmente la estabilización con cal se aplica cuando se busca mejorar las características de plasticidad y resistencia de suelos arcillosos.

3.3.3 Estabilización con asfalto

El mejoramiento de las propiedades de los suelos con el asfalto y productos asfálticos es una técnica socorrida y frecuentemente muy efectiva. Son tres los tipos que se han usado para este fin;

1. Productos bituminosos, que son sistemas anhidros de hidrocarburos totalmente solubles en bisulfuro de carbono.
2. Productos asfálticos, procedentes de la destilación y refinamiento del petróleo o asfaltos naturales, mas raramente.
3. Productos residuo de la destilación destructiva de materiales orgánicos, tales como el carbón, ciertos aceites, lignitos, turbas y maderas (alquitranes).

Los productos asfálticos y bituminosos en general, son normalmente demasiado viscosos para que se puedan incorporar directamente a los suelos, por ello han de usarse calentados, emulsificados en agua (emulsiones) o rebajados con un solvente, volátil, como la gasolina.

Las emulsiones y asfaltos rebajados son los productos mas usados en estabilizaciones de suelos, pero se usan también alquitranes rebajados. Los

rebajados mas usuales son los de fraguado lento y medio, pero en las arenas se han usado también los de fraguado rápido con éxito.

3.3.4 Estabilización con ácido fosfórico y fosfatos

La estabilización con estos productos esta en gran parte en la fase experimental y es probable que nunca pase de ella, puesto que lo hasta ahora investigado indica que estos productos han de incorporarse en porcentajes similares a los que requiere el cemento o la cal y su precio es varias veces mas grande.

Parece ser que la ventaja más importante de estos estabilizantes están en los buenos resultados que se obtienen con cloritas, ante las que el cemento y la cal rinden resultados desfavorables.

Los estabilizantes fosfóricos limitan su acción a suelos ácidos y no son efectivos en los alcalinos, en los limos, ni en las arenas. Otra dificultad de estos estabilizantes esta en su manipulación, que es difícil aunque en general no son sustancias toxicas.

3.3.5 Estabilización con cloruro de sodio

Frecuentemente se ha usado el cloruro de sodio como un estabilizante de acción no muy durable o como ayuda en la superficie de deslizamiento contra el polvo.

El cloruro de sodio es efectivo en todos los suelos, aunque mucho menos en los que contienen materia orgánica. Su efecto estriba en producir reacciones

coloidales y en alterar las características del agua contenida en el suelo. Normalmente actúa como floculante y suele ayudar en la compactación.

Un uso muy particular, pero prometedor de la sal común es la disminución de permeabilidad que produce en muchas arcillas, lo que la hace útil para tratar las expansivas. La sal también beneficia la resistencia del suelo, así como el comportamiento de los suelos ante la congelación.

La principal desventaja de estos tratamientos es que la sal es muy soluble y, por lo tanto, fácilmente es lavada; por esto al principio se le adjudicó la calificación de no durable.

3.3.6 Estabilización con sulfatos de calcio (yeso) y cloruros de calcio

El efecto de estas sustancias, sus ventajas y desventajas son muy similares a las del cloruro de sodio, pero es común que su efecto en la compactación sea mucho menos marcado, así como su efecto sobre la permeabilidad, a la que a veces hacen aumentar, con lo que aumenta mucho la remoción por lavado. El yeso se ha usado con frecuencia como aditivo en mezclas de suelo-cemento para acelerar su fraguado, pero aun esta utilización debe ser contemplada con reserva por los problemas de florescencia.

3.3.7 Estabilización con hidróxido de sodio (soda cáustica)

La principal ventaja está en la facilidad con que se aplica y en el efecto que parece tener para ayudar a la compactación de los suelos.

La principal desventaja de la soda esta en su causticidad, que puede ser un peligro para los operadores y en el hecho de que se carbonata en el aire muy rápidamente y pierde su poder.

3.3.8 Estabilización con resinas y polímeros

Estos compuestos son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión de componentes orgánicos, a los que se denominan monómeros. Los polímeros naturales tienen la forma de resinas. La incorporación de polímeros a suelos se hace de dos maneras se añaden los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, sólido, en solución o en emulsión.

El vinsol es la resina que mas frecuentemente se ha utilizado como estabilizante, sobre todo en Europa. Los resultados que con ella se han obtenido son variables, pero alentadores; su acción se circunscribe a la de estabilizante de la mezcla ante la acción del agua, esta es en general la reacción de todas las resinas y polímeros.

Los contenidos de resinas y polímeros fluctúan normalmente entre 1% y 2% y únicamente pueden usarse con suelos ácidos.

Otra desventaja del producto es su degradación bacteriana, que limita su vida.

4. ARCILLAS

4.1 ORIGEN DE LOS SILICATOS

Aun con las técnicas modernas disponibles hoy en día, el conocimiento que se tiene de la corteza terrestre es muy limitado, ya que sólo se ha explorado una pequeñísima porción del casquete superficial, es decir aproximadamente los primeros cuatro kilómetros a partir de la superficie, o sea el 0.062% del diámetro terrestre (12.740 km). Sin embargo, mediante métodos indirectos, como los sismológicos, se ha logrado poner en evidencia que la estructura interna de la Tierra, a semejanza de una cebolla, está formada por capas que tienen una composición más o menos definida: así, hacia el interior de la superficie encontramos la capa llamada SIAL, situada entre los 40 y 100 km de profundidad, que es rica en sílice (SiO_2) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7 g/cm^3 . Más hacia el interior hallaremos la capa denominada SIMA, rica en hierro y magnesio pero con algunas porciones de sílice, aluminio y otros elementos, de carácter básico, más caliente y fluida que la capa SIAL. La capa SIMA es considerada la madre directa de todas las formaciones minerales que afloraron a la superficie. Es decir, que es muy probable que las primeras rocas superficiales se hayan formado por el enfriamiento y cristalización posterior de las corrientes de magma provenientes de la capa SIMA, acarreadas por las erupciones volcánicas y enfriadas en la superficie, dando origen a las rocas básicas como los basaltos. En cambio, la afloración del material fundido proveniente de la capa SIAL, a través de las hendiduras y fallas, originó la formación de las rocas ígneas de carácter ácido: los granitos. Las segregaciones del magma caliente, su migración y su compactación posteriores, dieron origen a diversos minerales, como las cromitas, magnetitas, corindón, sienitas,

mármoles, y cuarcitas entre otros. Unos más resultaron de la presión de los suelos al replegarse, como ocurrió con el grafito.

La acción de los vapores y de los gases calientes sobre las primeras rocas condujo a su alteración y a la consecuente formación de mezclas finas de minerales. Estas últimas permanecieron en forma de residuos o bien fueron transportadas y depositadas en los lechos de los ríos y en los fondos marinos. El arrastre y depósito de esas mezclas finas pudo efectuarse por vía fluvial, es decir, por acción de los ríos o bien por medio de los glaciares y los vientos. El resultado fue su depósito en los lechos lacustres y marinos, lo cual produjo los yacimientos más importantes.

Por lo anterior, es fácil aceptar que el 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos. La corteza tiene una densidad media de 2.7 g/cm^3 , mientras que la densidad media de la Tierra es de 5.5 g/cm^3 , o sea que en el interior se concentran los elementos más pesados, hierro, níquel, etc.

Los silicatos forman el árbol genealógico de las arcillas. La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo y, su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra, es decir, que dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición. Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neoformación y 3) por transformación. El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares.

Los mecanismos de neoformación y transformación involucran los procesos de desintegración mecánica y química.

La desintegración mecánica consiste en la reducción sucesiva del tamaño de grandes masas de rocas hasta obtener arenas o en casos extremos limos y rara vez arcillas. Los medios de acción de la desintegración mecánica comprenden agentes físicos de interperización como cambios periódicos de temperatura, la acción de congelación del agua y el fracturamiento mecánico de las rocas.

La desintegración química por otro lado, produce arcillas como efecto final de descomposición, al modificar la composición mineralógica o química de las rocas por acción principalmente del agua. Los principales mecanismos de desintegración química por los cuales el agua forma suelos son la oxidación, hidratación, y carbonatación.

Los efectos químicos de la vegetación juegan un papel muy importante no despreciable en la formación de suelos.

Los cambios de temperatura son catalizadores que acentúan estos mecanismos de formación, obteniéndose frecuentemente, pero no como regla general, formaciones arcillosas en zonas calidas y suelos de grano grueso o arenas en zonas frías.

4.2 DEFINICION

Su significado depende de su campo de acción:

Desde el punto de vista geológico

Las arcillas son minerales naturales que se formaron hace varios millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra.

Desde el punto de vista mineralógico

Engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 μ).

Desde el punto de vista petrológico

La arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μ .

Desde el punto de vista técnico

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 2 micras.

Químicamente los minerales de arcilla son silicatos de aluminio y/o hierro y magnesio. Algunas de ellas también contienen tierras alcalinas como componentes esenciales. Estos minerales son predominantemente cristalinos, los átomos que los componen están arreglados en patrones geométricos definidos.

4.3 ESTRUCTURA DE LOS MINERALES DE ARCILLA

Los minerales más importantes en la ingeniería de suelos son aquellos de grano muy fino por ser caracterizados por el color, dureza, y separamiento, no pueden ser vistos como partículas sin la ayuda de un microscopio poderoso. A medida que decrece el tamaño de la partícula el área superficial de la partícula por gramo aumenta exponencialmente. Las propiedades de las arcillas y suelos arcillosos son en gran parte debido a su mineralogía y a

la química de la superficie, particularmente en lo concerniente a la interacción con el agua.

Los minerales de arcilla son estructuralmente similares y en muchos casos idénticos a las micas, es así que ellos tienen una estructura laminar, con cada lamina compuesta con sublamina u hojas de sílice y de alumina.

Dentro de la lamina de sílice cada ion de sílice está rodeado por cuatro iones de oxígeno, formando un tetraedro; de aquí ha de llamarse la lamina tetraédrica, algunas veces abreviada con la letra ``A`` y debido a que está el aluminio rodeado por seis iones hidroxilos (OH) formando un octaedro; de aquí ha de llamarse la lamina octaédrica o ``B``. El ion metálico en estas laminas pueden variar ampliamente en algunos minerales sin cambiar ampliamente las propiedades; por ejemplo, Mg^{+2} o Fe^{+2} pueden apoderarse del aluminio y el aluminio puede apoderarse de algunos sílices. A esto se le denomina sustituciones isomorfas, ya que no cambian la forma mineral; sin embargo, refiriéndonos a una lamina ``B`` como una lamina alumina hidratada es incorrecto, ya que la lamina puede no contener ningún aluminio.

El método por el cual un tetraedro u octaedro individual se combinan para formar laminas tetraédricas u octaédricas es por medio de compartir sus iones de las esquinas, mostrado en la figura 1y2. Estas laminas son los ladrillos que forman los minerales arcillosos.

Usualmente una o más laminas ``A`` son unidas a una lamina ``B`` por también compartir iones de las esquinas; esto es, anillos de iones de O apicales de la lamina A comparte con anillos similares en el B, como se muestra en la figura 1y2. El resultado está en la figura 3y4, los iones compartidos son indicados por los puntos de contacto entre los tetraedros y los octaedros, donde la A se une a la B. Las laminas se extienden

indefinidamente en las direcciones X y Y, a filos de cristales los cuales por lo tanto tienen posiciones de uniones iónicas insatisfechas. Entonces un cristal no puede ser considerado una ``molécula`` en un sentido de química clásica.

En la dirección Z, las láminas se agrupan una sobre otras pero las uniones entre láminas son relativamente débiles, entonces los minerales de arcillas son minerales en formas de escamas. El espesor de cada escama está en el rango de los ángstrom.

La mayoría de todos los minerales de arcilla tienen bien sea la estructura de lamina AB o ABA mostradas en la figura 3y4. Debido a la razón entre la lamina A a B, estas arcillas son referidas y clasificadas como minerales arcillosos 1:1 y 2:1, respectivamente. Una clasificación de minerales arcillosos comunes basados en las razones de A a B se muestra en la tabla 4. Se debe notar que el espesor de la estructura de la laminas está en el orden de 7.15 Å para una lamina AB y de 9.6 Å para una lamina ABA.

Figura1. Coordinación Tetraédrica

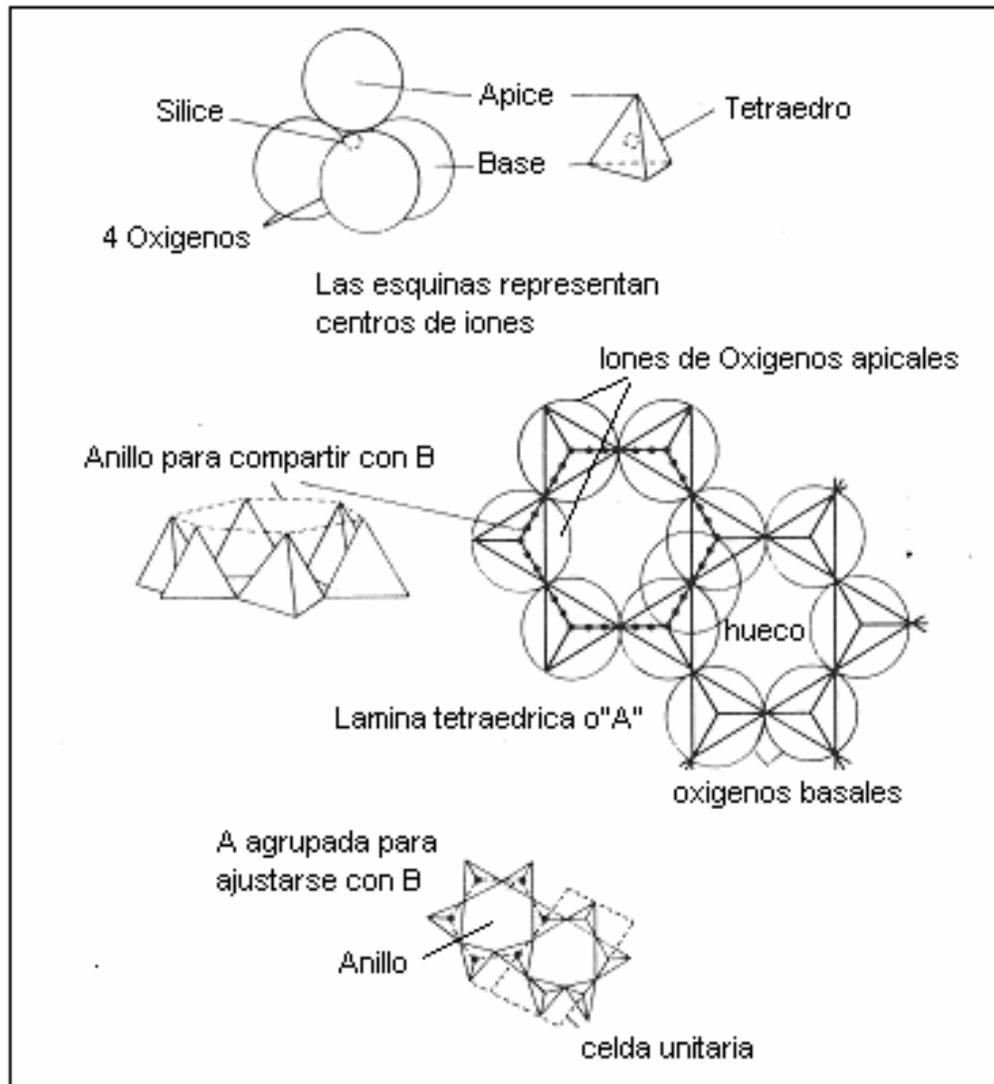


Figura 2. Coordinación Octaédrica

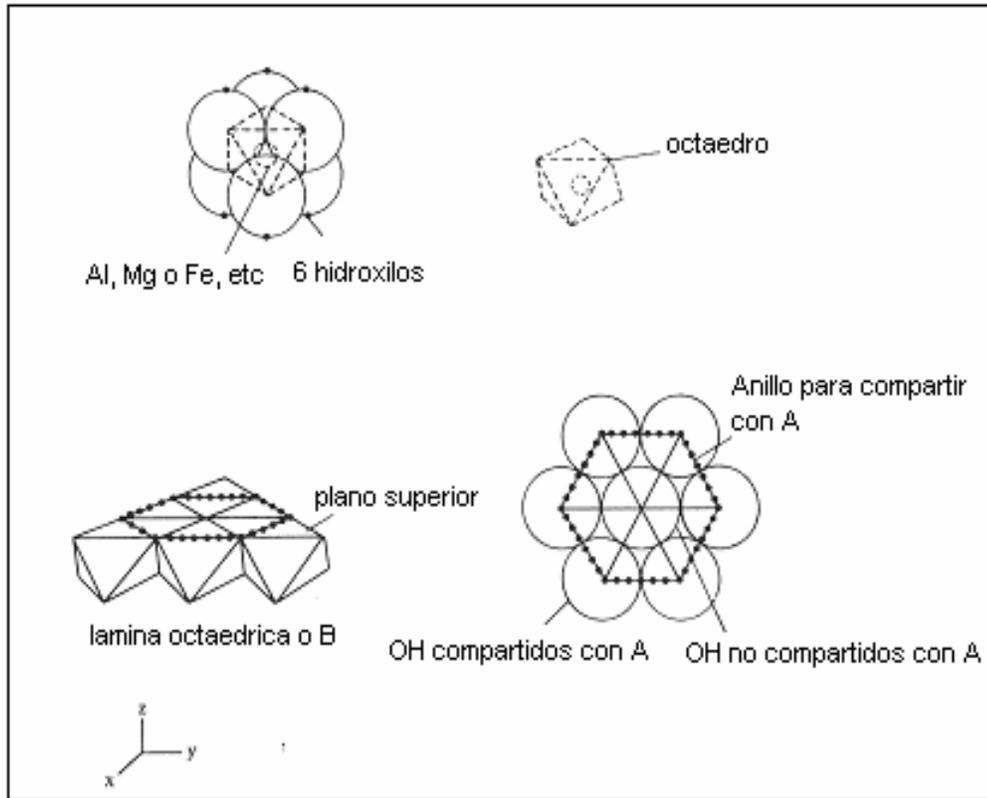


Figura 3. Caolinita

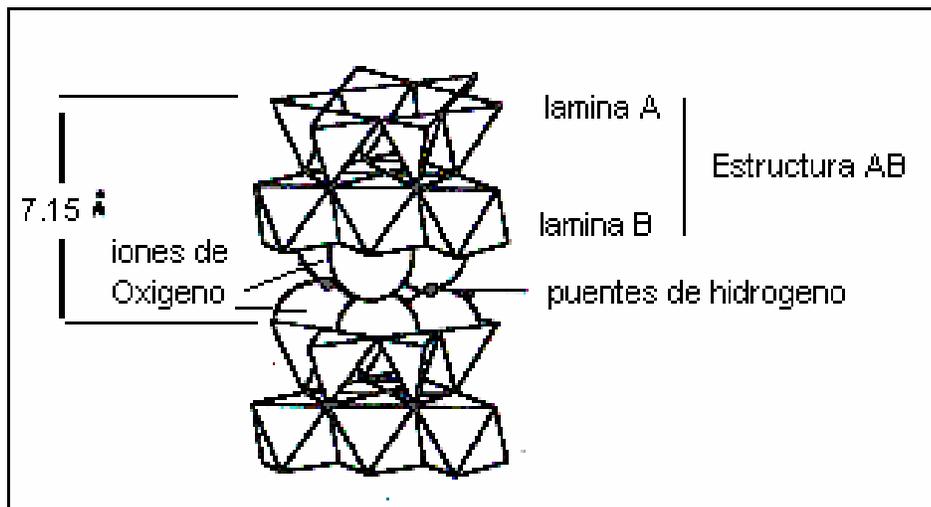
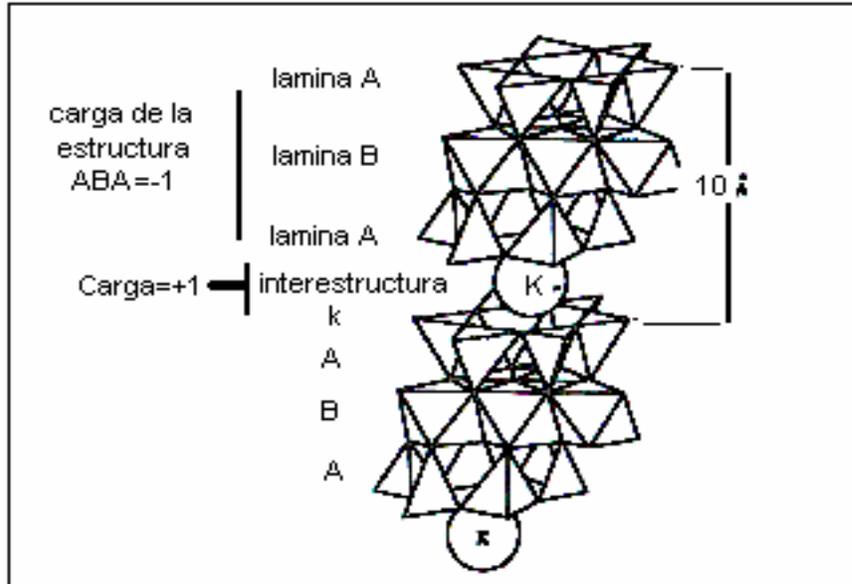


Figura 4. Mica



4.3.1 Minerales de arcilla comunes

Tabla 4. Minerales de arcillas comunes

Tipo	Grupo	Carga negativa por unidad de formula	Minerales comunes	Espesor estructura (Å°)
1:1	Caolinita	0	Caolinita Halloisita	7,15 10
2:1	montmorillonita Vermiculita Mica	0,5-1,3 1,2-1,8 1,2-2,0 2 2	montmorillonita Vermiculita Illita Muscovita Biotita	Expansiva >10 14 10 10 10
2:1:1	Clorita	0	Clorita	14
0:1	Alumina Minerales de oxido de Hierro	0 0	Gibbsite Hematita Lepidocrosita Geotita	4,85 - - -

La Caolinita cuando se calienta en su forma pura crea la porcelana. La Caolinita es común en los suelos, y es abundante en suelos altamente climáticos de regiones tropicales y semitropicales. Los cristales de la Caolinita son justamente fuertes debido a las uniones de hidrogeno entre los O's de las laminas tetraedrales y de los OH's de la próxima lamina octaedral, como se muestra en la figura 3. Esto es, en las laminas B los átomos de hidrógeno han perdido sus electrones a oxígenos adyacentes, entonces cada par OH constituye un ion OH⁻. El hidrogeno sin un electrón se convierte en un protón, es decir un pequeña y concentrada carga positiva. El protón es móvil tanto que fácilmente toma el exterior del plano expuesto OH, cerca a los oxígenos expuestos del la próxima estructura AB. Un protón situado entre dos iones de oxigeno atrae ambos, es así que se llama a esto una unión de hidrogeno.

El mineral mas común de arcilla con estructura 2:1 es la montmorillonita, nombrada como la ciudad en Francia donde se describió por primera vez. En este mineral la lamina B con sus hidroxilos se coloca entre dos laminas A, la cual no deja oportunidad para una unión de hidrógeno entre las laminas ABA.

El resultado es que la montmorillonita fácilmente absorbe cantidades variables de agua entre sus laminas ABA, expandiéndose drásticamente y en algunos casos afectando desastrosamente estructuras soportadas sobre esta arcilla. Entonces la montmorillonita es el mayor mineral arcilloso entre las arcillas expansivas, la cual fácilmente se convierte en una arcilla costosa si no se reconoce y se trata por la tenacidad de un ingeniero de suelos. La ceniza volcánica que por medio del ambiente llega a ser pura montmorillonita se llama bentonita.

La estructura del cristal de la montmorillonita usualmente contiene mas iones negativos que positivos, resultando en una carga neta negativa. Los cristales cargados negativamente atraen y retienen iones positivos o cationes los cuales son unidos a la superficie del mineral entre y alrededor de las estructuras laminares. Tales iones son fácilmente cambiados por otros iones en solución y son referidos como cationes intercambiables. La capacidad de intercambio cationico es la cantidad de iones intercambiables por unidad de peso del suelo, usualmente expresado en miliequivalentes por 100g. y es una indicación imperfecta del contenido de montmorillonita. La Caolinita tiene una pequeña pero medible capacidad de intercambio cationico debido a la adsorción de iones positivos o negativos en los filos de los cristales. La expansibilidad de la montmorillonita es grandemente influenciada por el tamaño y carga del cation interestructural. Por ejemplo la montmorillonita de sodio o hidrogeno es altamente expandible, la montmorillonita de calcio o magnesio exhibe una expansión controlable. Iones de potasio y amonio o moléculas orgánicas polares en la interestructura tienden a estabilizar la expansión.

Las micas son estructuralmente similares a la montmorillonita excepto que la carga negativa es mayor y es balanceada por iones de potasio entre las estructuras (Fig.4). Los iones de potasio son cerca del mismo tamaño que al oxígeno, un tamaño cercanamente ideal para ajustarse en los orificios hexagonales de la superficie y para sostener juntas estructuras ABA sucesivas en una configuración no expandible. Entonces la mica, como la caolinita, no se expande pero por una razón diferente.

Intermediamente entre la mica y la montmorillonita esta la illita, nombrada como un estado muy reconocido en los Estados Unidos. La illita tiene menos potasio que la mica, es de grano más fino y menos cristalizado, y no es

expansiva. Mezclas interestratificadas de montmorillonitas e illitas son comunes en suelos.

4.4 PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2μ).

Su morfología laminar (filosilicatos).

Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como

capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

4.4.1 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

Caolinita de elevada cristalinidad hasta $15 \text{ m}^2/\text{g}$

Caolinita de baja cristalinidad hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$

Halloisita hasta $60 \text{ m}^2/\text{g}$

Hilita hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$

Montmorillonita $80\text{-}300 \text{ m}^2/\text{g}$

Sepiolita $100\text{-}240 \text{ m}^2/\text{g}$

Paligorskita $100\text{-}200 \text{ m}^2/\text{g}$

4.4.2 Capacidad de Intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmécticas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de

intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

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

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

A continuación se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en meq/100 g):

Caolinita: 3-5
Halloisita: 10-40
Illita: 10-50
Clorita: 10-50
Vermiculita: 100-200
Montmorillonita: 80-200
Sepiolita-paligorskita: 20-35

4.4.3 Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el

espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

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

4.4.4 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmécticas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmécticas tienen una

gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esméctica, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

4.4.5 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, et al. 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

4.4.6 Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

4.4.7 Relaciones arcilla – agua

La arcilla se encuentra naturalmente asociada con agua, y las propiedades de cualquier mineral arcilloso o mezcla de minerales son profundamente influenciadas por la cantidad de agua presente. Ya se sabe del alto valor de la superficie específica de las arcillas en la cual una gran parte del número total de átomos que forma una partícula forma la superficie de la partícula, en general, las partículas de arcillas consisten de láminas cuyo diámetro puede ser tan grande como cientos de veces el ancho de la partícula. También se conoce de la sustitución isomorfica que puede llevarse a cabo en algunos minerales de arcillas, donde se presentan átomos sustitutos con valencia mas baja que los átomos que estos remplazan dando lugar a laminas de minerales en las cuales hay deficiencias localizadas de carga positiva. Iones positivos o cationes son por tanto atraídos a estos lugares y adsorbidos sobre la superficie de la partícula.

En las moléculas de agua el centro de las cargas positivas y negativas no coinciden, es así que las moléculas se comportan como dipolos. Entonces las moléculas de agua pueden ser adsorbidas sobre la superficie de la partícula de arcilla cargada negativamente. Estos dipolos de agua son

fuertemente orientados en la superficie debido a las altas fuerzas eléctricas que las atraen a la superficie de cristal de la arcilla. Mas de una lámina de moléculas de agua pueden ser adsorbidas de esta manera, pero a medida que la distancia de la molécula desde la superficie aumenta, la fuerza de atracción disminuye. Debido a esta orientación se ha planteado que el agua altamente orientado cerca de la superficie de arcilla tiene propiedades diferentes a aquellas del agua ``normal``, entonces se considera que el agua orientada afecta el comportamiento de las partículas de arcilla cuando son sujetas a esfuerzos externos, ya que el agua adsorbida de la superficie viene entre las superficies de las partículas.

Debe tenerse en cuenta que los átomos de las moléculas de agua de la frontera no son estáticas, por lo contrario están en un estado de agitación continua, siendo un movimiento translacional y rotacional al azar a un estado dependiente del estado térmico del sistema. Consecuentemente, la orientación de una molécula de agua particular cerca de la superficie de una partícula de arcilla puede ser considerada como un fenómeno transitorio. El grado de la estructura inducida en las estructuras moleculares implica un promedio estadístico de las direcciones de orientaciones de un gran número de moléculas. Unas moléculas pueden escapar de la frontera o del estado orientado así como otras pueden tomar su lugar. La posibilidad de que una molécula salga del estado orientado depende de su proximidad a la superficie de la arcilla, temperatura ambiente, y el grado de coincidencia de las vibraciones moleculares con la dirección del esfuerzo aplicado a nivel molecular. Las investigaciones han mostrado que el agua adsorbida en la superficie de una partícula de arcilla puede ser cambiada con otras moléculas de agua relativamente rápido, es así que su rata de difusión es alta comparada con por ejemplo la movilidad de los grupos hidroxilos OH en la estructura cristalina de una partícula de arcilla.

4.5 IDENTIFICACION DE MINERALES DE ARCILLAS

El rol de la identificación de los minerales en un suelo es muy importante. La composición mineralógica de un suelo es indirectamente indicado por pruebas rutinarias de ingeniería tal como la gradación de tamaño de la partícula y la plasticidad. Sin embargo para un uso inteligente del suelo por ejemplo el de anticipar un problema y encontrar una solución se debe identificar los principales componentes mineralógicos de un determinado suelo. Algunos métodos de identificación de minerales son:

4.51 Difracción de rayos X

La difracción de rayos x ofrece un medio para la medición de las distancias entre planos repetitivos en la estructura del cristal. Los espacios basales de los minerales de arcillas dan picos de difracción muy fuertes, especialmente cuando los cristales están orientados planamente y paralelamente a la superficie de la muestra.

Este sistema permite averiguar el ancho de las láminas. Para realizar la operación la muestra se reduce a polvo y se coloca en un soporte cuya base es rotatoria. Cuando un rayo x se dirige a la muestra, a medida que este rota, el rayo se difracta, y la difracción se registra en una película sensible. Cada línea que aparece en la película corresponde a una reflexión de cada uno de los diferentes planos atómicos que presenta dicha muestra. Una vez conocido el ancho de las láminas se puede determinar el arreglo atómico de la estructura de arcilla, y por lo tanto el tipo al cual pertenece.

4.5.2 Análisis termodiferencial

Este método utiliza una pequeña muestra de suelo y una muestra de referencia de un material inerte tal como el Al_2O_3 , las dos muestras son calentadas a una rata uniforme, y las diferencias de temperatura al minuto entre la muestra y la referencia son continuamente registradas. Cuando ocurre una reacción tal como perdida de agua, quema de materia orgánica, e.t.c, el calor bien sea consumido o liberado por la reacción causa una diferencia de temperatura, registrada como un pico endotérmico o exotérmico, respectivamente.

4.5.3 Capacidad de intercambio cationico

La capacidad de reemplazar iones es variable, de acuerdo con cada tipo de arcilla en algunos casos es posible reconocer el tipo de arcilla por este método. A Continuación se coloca una tabla en el cual se observa la capacidad de absorción de cationes para ciertos tipos de arcilla, expresada en miliequivalentes por 100 gramos de arcilla.

ARCILLA	CAPACIDAD DE INTERCAMBIO
Caolinita	3-15
Halloysita 2H ₂ O	5-10
Clorita	10-40
Illita	10-40
Sepiolita-Attapulgita	20-30
Halloysita 4H ₂ O	40-50
Montmorillonita	80-150
Vermiculita	100-150

4.5.4 Microscopio electrónico

En muchos casos es posible llegar a un conocimiento satisfactorio de la forma de las partículas de arcillas y esto se logra por medio de las corrientes de electrones, que tienen un poder mejor que el microscopio óptico. Con frecuencia tales conocimientos permiten la identificación del tipo de arcilla.

4.5.5 Métodos ópticos

Este sistema de identificar el tipo de arcilla se basa en la determinación de ciertas características de la mineralogía óptica, especialmente en los índices de refracción.

4.5.6 Métodos químicos

Estos métodos se basan en el hecho de que las relaciones silicio y sesquioxidos, silicio y aluminio generalmente muestran variaciones de los diferentes tipos de arcillas.

4.6 APLICACIONES

Prácticamente todas las arcillas comunes son aptas para usos en el campo de la cerámica de construcción (tejas, ladrillos, tubos, baldosas...), alfarería tradicional, lozas, azulejos y gres., primando las consideraciones económicas.

Son así mismo utilizadas en la manufactura de cementos, como fuente de alúmina y sílice, y en la producción de áridos ligeros (arcillas expandidas).

En el campo de la ingeniería civil las bentonitas son de gran interés:

Se utiliza para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc.

Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad. Las bentonitas sódicas o cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso.

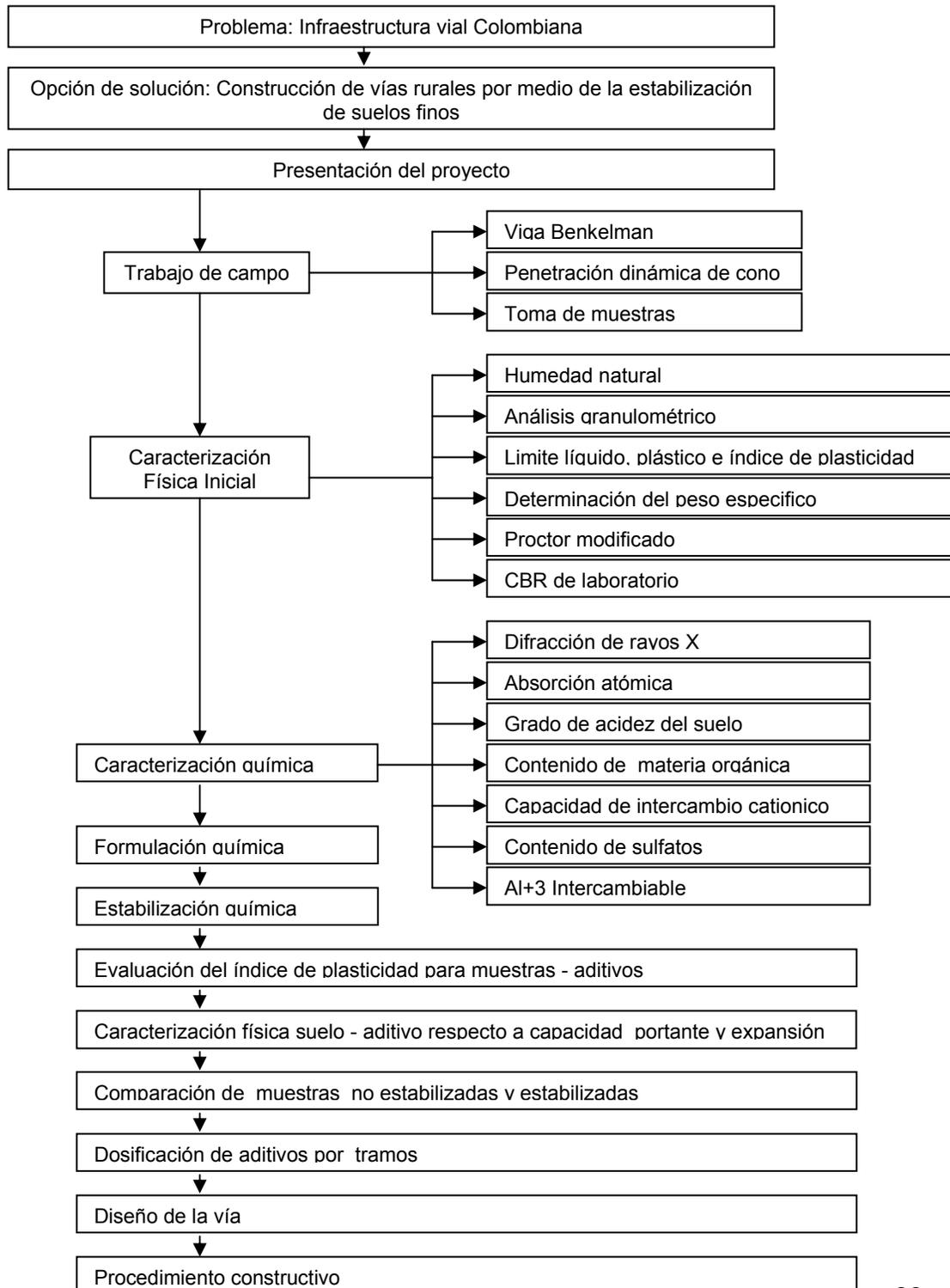
Los usos en este campo se pueden resumir en:

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

5. METODOLOGIA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

Aplicada a la estabilización física y química de suelos finos .

FUENTE: PROYECTO DE INVESTIGACION CORASFALTOS



Descripción:

- ❖ Problema: literatura analizada sobre el subdesarrollo vial colombiano.
- ❖ Alternativa de solución: construcción de vías rurales por medio de la estabilización física y química de suelos finos de subrasante.
- ❖ Presentación del proyecto: construcción de una vía rural estabilizada física y químicamente cuya longitud es de 28 Km.
- ❖ Trabajo de campo: realización de los siguientes ensayos:
 - Viga Benkelman: conocer el estado del suelo e identificar puntos críticos de la vía.
 - Penetración dinámica de cono: conocer resistencia del suelo al corte y correlacionar su valor de CBR.
 - Toma de muestras: material para realizar los diferentes ensayos en el laboratorio (se tomaron 55 muestras).
- ❖ Caracterización física inicial: realización de los diferentes ensayos mostrados en el diagrama de flujo para conocer el comportamiento del material en el terreno. Las muestras que presentan alto índice de plasticidad y baja capacidad portante serán estudiadas por medio de la caracterización química.
- ❖ Caracterización química: a las muestras de propiedades físico-mecánicas bajas se les realizara los diferentes ensayos mostrados en el diagrama de flujo para entender su comportamiento químico.
- ❖ Formulación química: con base en la caracterización física y química se presentan diferentes aditivos y su concentración en porcentaje en las muestras para mejorar el comportamiento de éstas respecto al índice de plasticidad y capacidad portante.
- ❖ Estabilización química: presenta el procedimiento por el cual el aditivo se agrega al suelo respecto a su dosificación, humedad optima, proceso de curado, limites liquido y plástico e índice de plasticidad, evaluación de CBR y selección del aditivo.
- ❖ Evaluación del índice de plasticidad para las muestras estabilizadas : se evaluara el índice de plasticidad para cada muestra estabilizada desde el día 7 hasta el día 21, de esta evaluación se elegirá el aditivo

que reduzca considerablemente el índice de plasticidad de la muestra y se procederá a evaluar la capacidad portante.

- ❖ Caracterización física de las muestras estabilizadas respecto a la capacidad portante: se realizara el ensayo de CBR a la muestra con el aditivo escogido del ítem anterior.
- ❖ Comparación de propiedades de las muestras no estabilizadas y estabilizadas: se presentan los resultados en las muestras no estabilizadas y se confrontará con las muestras estabilizadas con su correspondiente aditivo y dosificación.
- ❖ Dosificación de aditivos por tramos homogéneos: con base en los resultados de la caracterización física y estabilización química se escogerá el aditivo y su dosificación por tramos de la vía.
- ❖ Diseño estructural de la estabilización: con base en los resultados de campo y de laboratorio se diseña la estructura que soportara el paso de los vehículos, es decir la capa de subrasante natural y una capa de subrasante estabilizada física y químicamente, definiendo su espesor, requerimientos técnicos, manejo de aguas ,entre otros.
- ❖ Procedimiento constructivo: señalar las actividades necesarias para la construcción de la subrasante estabilizada anteriormente diseñada.

5.1. PRESENTACION DEL PROYECTO

La metodología de laboratorio y de campo presentada a lo largo del proyecto es propiedad de Corasaltos y a continuación se presenta el mejoramiento de las condiciones de operatividad de una vía rural de 28 Kilómetros por medio de la estabilización física y química de la subrasante natural del terreno, para esto se organizaron las actividades de acuerdo al diagrama de flujo anteriormente mostrado, a continuación se presentaran los procedimientos de los ensayos realizados para el trabajo en campo y laboratorio, luego se presentaran los resultados de estos ensayos y se seguirá con la evolución del diagrama de flujo.

5.2 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE TRABAJO DE CAMPO

5.2.1 Medida de la deflexión y determinación de la curvatura empleando la viga Benkelman.

Norma: INV E-795

Consiste en determinar simultáneamente con una viga Benkelman la deflexión recuperable y el radio de curvatura de una superficie, producidos por una carga estática. A tal fin se utiliza un camión donde la carga, tamaño de las llantas, espaciamiento entre ruedas duales, y presión de inflado están normalizados.

5.2.2 Relación de soporte del suelo en el terreno mediante la penetración dinámica de cono.

Norma: Sudafricana para PDC

A partir de este ensayo se determina la cantidad de centímetros que penetra una barra en un suelo para un número determinado de golpes. Con base en esta relación, se pueden obtener valores asociados de C.B.R y Módulos Resilientes de suelos.

5.2.3 Toma de muestras

Norma: INV E-103

Esta norma establece métodos para la conservación de las muestras inmediatamente después de obtenidas en el terreno, así como para su transporte y manejo.

5.3 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE TRABAJO DE LABORATORIO

5.3.1 Caracterización física inicial

5.3.1.1 Preparación de muestras de suelos por cuarteo

Norma: INV E-104, AASHTO T-248

Divide las muestras de suelos obtenidas en el campo, en porciones que sean representativas y que tengan los tamaños adecuados para los ensayos a desarrollar.

5.3.1.2 Determinación del contenido de agua (humedad)

Norma: INV E-122, ASTM D-2216

Mediante diferencias de pesos se determina la cantidad de agua removida luego de someter la muestra a temperatura de 110 ± 5 °C en un horno.

5.3.1.3 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

Norma: INV E-213, ASTM C-136

Se determinan los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

5.3.1.4 Determinación del límite líquido de los suelos

Norma: INV E-125, AASHTO T-89

El suelo corresponde a una muestra tamizada sobre el tamiz No. 40 al cual se le adiciona agua con el fin de colocarlo sobre la cazuela de Casagrande, con rotaciones de la cazuela o golpes superiores o inferiores a 25, el punto de humedad en el cual se considera que el suelo está entre estado líquido y plástico.

5.3.1.5 Límite plástico e índice de plasticidad

Norma: INV E-126, AASHTO T-90

Consiste en determinar la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelo de unos 3 mm de diámetro, sin que dichos cilindros se desmoronen. El índice de plasticidad corresponderá a la diferencia entre el límite líquido y plástico.

5.3.1.6 Determinación del peso específico

Norma: INV E-128, AASHTO T-100

La determinación se realiza por medio de un picnómetro o frasco volumétrico calibrado mediante aplicación de vacío al frasco que contiene la muestra, hasta que se eliminan todos los vacíos contenidos en la muestra. Se usara para relacionar la dosificación del aditivo en laboratorio y en campo.

5.3.1.7 Relaciones de peso unitario-humedad en los suelos

(Equipo modificado)

Norma: INV E-142, AASHTO T-180

Este método se emplea para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos compactados en un molde de 102 o 152 mm de diámetro y altura de 116 mm, con collar de extensión de 60 mm de altura (el uso del tipo de molde depende del tamaño de partícula de la muestra). Las capas de suelo se compactan con un martillo de 10 Lb. Y una energía de 55 golpes/capa. El procedimiento se repite para contenidos de humedad diferentes, estableciendo la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance un valor máximo de compactación o densidad, con la cual se deberá trabajar en campo.

5.3.1.8 Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio)

NORMA INV E-148

El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio con condiciones óptimas de humedad y densidad. El procedimiento consiste en la preparación de especímenes cilíndricos en moldes de 152 mm de diámetro y 177 mm de altura, provisto de un collar suplementario y una placa de base inferior. El material preparado se va colocando en capas y se compacta con el martillo de Proctor modificado, con energías de 12, 26 y 55 golpes por capa. Finalizada la compactación de sobreponen pesas de 4 Kilos, simulando el efecto de las capas soportadas en el pavimento. Para evaluar el efecto de saturación en campo, los moldes se someten a inmersión durante 4 días. Transcurrido este periodo, se falla cada molde a una velocidad de 1.27mm/min, comparando la carga necesitada para penetrar la muestra 0.1 y 0.2 pulgadas con cargas patrones. Dicha relación refleja la capacidad de soporte de la subrasante.

5.3.2 Caracterización química

5.3.2.1 Análisis por difracción de RAYOS X

Procedimiento según Centro Internacional Datos de Difracción ICDD

Equipo: Difractómetro de Rayos-X marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB

El procedimiento consiste en la maceración de una muestra de agregado mineral, lo cual se realiza en un mortero de ágata seleccionando previamente el material que pasa por malla de 38 μm . Ese material es colocado en el portamuestras del equipo, mediante la técnica de llenado lateral, con el cual se obtiene la identificación cualitativa de las fases presentes en las muestras y por comparación de las reflexiones del perfil observado con las reflexiones

de los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD), utilizando el software respectivo.

5.3.2.2 Absorción atómica

Equipo: Espectrofotómetro Absorción Atómica, marca Perkin Elmer

A una muestra pulverizada (<100 mallas) se le practica una fusión con tetraborato-metaborato de litio y posteriormente se disuelve con solución de ácido nítrico. Los elementos se cuantifican a partir de las soluciones ácidas obtenidas, utilizando la técnica de ICP-MS (Plasma Acoplado Inductivamente - Espectrometría de Masas), la cual consiste en hacer aspirar las muestras por el equipo utilizando una antorcha de plasma que permite la atomización y el proceso de emisión característico de los átomos presentes en la muestra. Las lecturas de las muestras son comparadas con las obtenidas de patrones de calibración para determinar la concentración del elemento en la muestra.

5.3.2.3 Determinación del grado de acidez del suelo

Norma: I.N.V. E-131, Anal. Suelos JACKSON M

Se basa en la preparación del tanto por ciento de saturación en agua de la muestra de suelo y posterior medida del pH con un electrodo calibrado a tres rangos de pH.

5.3.2.4 Contenido de materia orgánica

Norma: Manual de procedimientos para suelos IGAG.

La materia orgánica es oxidada mediante ácido crómico en presencia de un exceso de ácido sulfúrico, valorando el exceso de ácido crómico con una disolución de sal ferrosa.

5.3.2.5 Determinación capacidad de intercambio catiónico (CIC)
Norma: Manual de procedimientos para suelos IGAG.

Se determina mediante saturación y posterior lavado de la muestra de suelo con una solución de acetato de amonio (ACONH_4 .) El amonio retenido o fijado en el suelo se extrae mediante lixiviación y posteriormente se titula el ácido clorhídrico formado por la adición de formaldehído neutralizado a la solución.

5.3.2.6 Contenido de sulfatos

Norma: Procedimiento del Standard Methods .

El sulfato presente en los extractos, se establece convencionalmente por gravimetría mediante la determinación cuantitativa de los iones sulfato en forma de sulfato de bario (BaSO_4) por precipitación con cloruro de bario (BaCl_2). A bajas concentraciones en las cuales la cantidad de sulfato no precipita, se titula el exceso de ión bario (Ba) añadido, mediante un agente acomplejante (EDTA); la valoración se realiza por retroceso.

5.3.2.7 Aluminio intercambiable (o extractable)

Norma: Manual de procedimientos para suelos IGAG.

En el suelo tratado con solución de cloruro de potasio (KCl), el ión potasio (K^+) reemplaza iones hidrónio (H^+) y aluminio (Al^{3+}), formándose en solución ácido clorhídrico (HCl) y cloruro de aluminio (AlCl_3), titulados con solución estandarizada de NaOH.

5.4 PRESENTACION DE RESULTADOS DE CAMPO

5.4.1 Viga benkelman

El proceso de caracterización de las vías se inicio determinando las deflexiones elásticas recuperables del suelo de subrasante mediante la viga benkelman abscisando cada 40m. Esto con el fin de determinar el estado actual del suelo existente e identificar puntos críticos del tramo de estudio.

De acuerdo con las deflexiones obtenidas y considerando una distribución normal, la cuantificación de la confiabilidad de los datos se considera como el rango definido por la media + dos veces la desviación estandar.

Este rango abarcara aproximadamente el 95% del numero total de los datos, obteniéndose los siguientes valores característicos

Tabla 5. Resultados viga Benkelman

TRAMO	MEDIA (mm)	DESV. ESTD (mm)	DEFLEX. CARACT. (mm)
K0+000 a K28+000	0.60	0.50	1.59
Km. 1	0.54	0.38	1.3
Km. 2	0.35	0.22	0.8
Km. 3	0.22	0.13	0.47
Km. 4	0.14	0.07	0.29
Km. 5	0.14	0.07	0.29
Km. 6	0.27	0.18	0.63
Km. 7	0.32	0.13	0.58
Km. 8	0.43	0.26	0.95
Km. 9	0.51	0.18	0.86
Km. 10	0.64	0.20	1.04

Km. 11	0.71	0.40	1.52
Km. 12	0.73	0.34	1.41
Km. 13	0.60	0.32	1.25
Km. 14	0.86	0.26	1.38
Km. 15	0.80	0.27	1.34
Km. 16	0.68	0.27	1.22
Km. 17	0.74	0.36	1.47
Km. 18	0.61	0.33	1.27
Km. 19	0.61	0.30	1.21
Km. 20	0.95	1.32	3.58
Km. 21	0.66	0.28	1.22
Km. 22	0.55	0.19	0.93
Km. 23	0.44	0.15	0.74
Km. 24	0.69	0.26	1.21
Km. 25	0.95	0.95	2.85
Km. 26	0.95	0.79	2.53
Km. 27	1.06	0.6	2.27

Figura 5. Deflexiones Benkelman elastica recuperable.

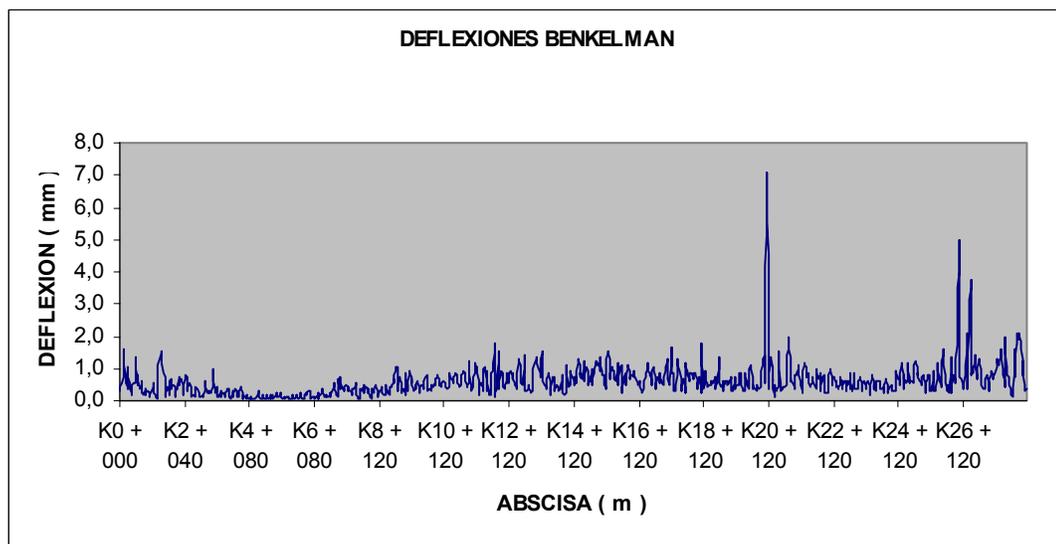
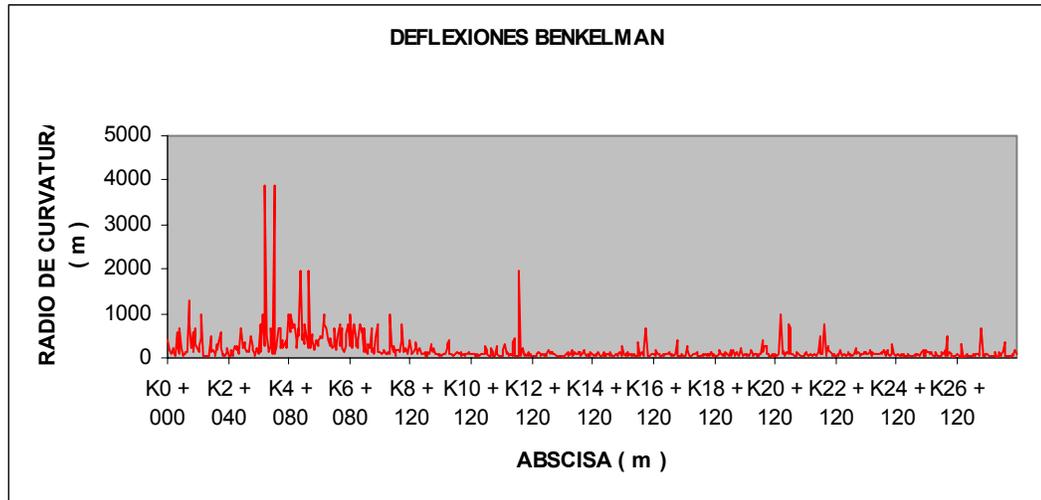


Figura 6. Deflexiones Benkelman radio de curvatura



5.4.2 Abscisado para apiques, toma de muestras y resultado de la prueba de cono dinámico

Los apiques, la toma de muestras y la prueba de Cono Dinámico se realizaron en los siguientes puntos, estos puntos se seleccionaron con base en los sectores más críticos identificados con base en las deflexiones Benkelman.

Tabla 6. Relación muestra abscisa

MUESTRA No.	Abscisa correspondiente (m)
1	120
2	560
3	1240
4	1840
5	2040
6	2920
7	3400
8	3800
9	4320

10	4880
11	5400
12	5880
13	6320
14	6920
15	7080
16	7600
17	8320
18	8640
19	9120
20	9880
21	10440
22	10880
23	11360
24	11640
25	12400
26	12920
27	13120
28	13880
29	14240
30	14920
31	15160
32	15760
33	16360
34	16960
35	17560
36	18040
37	18560
38	19400
39	19960
40	20440
41	20720
42	21200
43	21600
44	22120
45	22720
46	23280
47	23720
48	24200
49	24640
50	25480

51	25920
52	26320
53	26960
54	27400
55	27760

El ensayo de Cono Dinámico permite conocer la resistencia del suelo al efecto de corte, y correlacionar su valor de CBR, además se puede obtener el modulo de Subrasante de una expresión empírica a través de este ensayo.

Los valores encontrados para cada abscisa fueron:

Tabla 7. Relación abscisa, CBR y modulo subrasante.

ABSCISA	CBR (%)	MODULO SUBRASANTE(Kg/cm2)
120	6	629
560	4,1	554
1240	8	705
1840	8,1	706
2040	6,4	644
2920	5,5	613
3400	7,3	677
3800	5,8	622
4320	16,5	872
4880	15,1	855
5400	6,6	651
5880	8,1	707
6320	14	830
6920	5,4	609
7080	17,8	925
7600	13,4	825
8320	20,9	990
8640	8,5	722
9120	7	666
9880	7,7	694
10440	6	632
10880	7,9	703
11360	18,3	931
11640	3,7	515
12400	5,9	623

12920	3,5	514
13120	16,8	903
13880	1,8	417
14240	1,8	414
14920	1,7	402
15160	4,2	549
15760	1,9	418
16360	8,7	729
16960	4,7	570
17560	13,6	826
18040	5,4	608
18560	8,5	720
19400	7,3	675
19960	1,3	374
20440	5	571
20720	0,7	292
21200	1,6	399
21600	7,9	700
22120	1,9	418
22720	1,3	369
23280	5,9	620
23720	5,8	618
24200	2,7	466
24640	5,4	582
25480	6,9	663
25920	3,5	516
26320	1,6	394
26960	5,2	565
27400	7,2	665
27760	0,6	282

5.5 PRESENTACION DE RESULTADOS DE LABORATORIO

5.5.1 Caracterización física inicial

La primera etapa de laboratorio corresponde a la caracterización física del suelo, que se realizara con el fin de determinar las propiedades y características de las muestras representativas de la capa sobre la cual se construirá la vía. Los ensayos representativos corresponden a Humedad natural, Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor modificado, Capacidad de soporte CBR.

Posteriormente se procederá a escoger las muestras que presenten propiedades no deseables como alto índice de plasticidad mayor o igual a 15 ($IP \geq 15$), luego a estas muestras escogidas se le realizará la determinación de peso específico y se caracterizaran químicamente.

(En el anexo se presentan los registros de laboratorio de todas las pruebas)

Tabla 8. CARACTERIZACION FISICA INICIAL DEL SUELO DE LA VIA

MUESTRA	ABSCISA	CLASIFICACION SUCS	HUMEDAD NATURAL	PASA N°. 4	PASA N°. 200	LL	LP	IP	Humedad Optima (%)	Densidad seca máxima	CBR (95% DMS)	EXPANSION (%)
1	K0+120	SC	16,1	97,0	40,5	28	13	15	12,5	1,91	4,2	2,4
2	K0+560	SC	8,3	100,0	38,7	24	14	10	11,0	1,84	3,6	1,9
3	K1+240	SC	18,4	98,2	39,9	24	15	9	12,0	1,95	7,0	1,5
4	K1+840	SM	9,6	99,1	29,0	NP	NP	NP	11,0	1,96	37,0	0,6
5	K2+040	SM	4,8	97,3	28,5	NP	NP	NP	10,5	1,97	17,0	0,6
6	K2+920	SM	7,1	99,9	17,0	NP	NP	NP	11,0	1,87	32,0	0,0
7	K3+400	SM	7,8	84,1	16,9	NP	NP	NP	9,0	2,09	17,0	0,0
8	K3+800	SM	3,5	81,5	14,3	NP	NP	NP	10,0	1,89	15,0	0,1
9	K4+320	SP - SM	5,0	99,1	8,8	NP	NP	NP	12,5	1,79	19,0	0,3
10	K4+880	SM	3,8	95,9	13,3	NP	NP	NP	9,5	1,82	14,0	0,0
11	K5+400	SM - SC	3,7	88,7	33,3	25	18	7	9,0	2,05	17,0	0,4
12	K5+880	SM	4,2	94,9	16,4	NP	NP	NP	12,0	1,86	11,0	0,5
13	K6+320	SP	2,8	99,5	3,6	NP	NP	NP	10,5	1,75	6,0	0,0
14	K6+920	CL	14,6	99,7	79,0	40	18	22	15,0	1,82	3,7	1,2
15	K7+080	SC	7,8	85,0	33,2	34	13	21	12,5	1,93	4,1	3,6
16	K7+600	SC	12,8	93,0	51,9	35	17	18	12,0	1,93	5,0	3,1
17	K8+320	SM - SC	4,6	77,7	36,8	23	16	7	9,0	2,09	46,0	0,9
18	K8+640	CL	11,0	99,9	79,1	30	15	15	11,0	1,98	4,3	2,5
19	K9+120	SM	12,3	82,0	21,1	NP	NP	NP	7,0	2,08	35,0	1,8
20	K9+880	CL	12,5	94,9	73,9	36	15	21	14,5	1,81	1,6	8,7
21	K10+440	CL	15,4	93,3	80,7	40	18	22	19,5	1,69	4,3	2,6
22	K10+880	CL	11,3	99,8	79,7	42	18	24	15,0	1,84	3,1	3,0
23	K11+360	SC	25,3	81,7	41,1	26	16	10	10,8	2,03	5,0	0,3
24	K11+640	SC	12,8	72,5	36,5	30	17	13	10,0	2,04	8,0	1,5
25	K12+400	CL	18,2	97,2	86,4	41	16	25	12,5	1,88	1,8	7,6
26	K12+920	CL	28,6	87,3	68,2	44	16	28	12,5	1,93	1,1	9,3
27	K13+120	SM - SC	19,6	74,3	31,3	24	17	7	10,0	2,09	6,0	2,3
28	K13+880	SC	13,6	63,8	22,5	26	16	10	11,5	2,05	14,0	0,0

29	K14+240	SC	13,6	72,3	35,8	37	17	20	11,0	1,89	2,4	4,3
30	K14+920	CL	11,9	92,9	67,8	30	14	16	13,0	1,91	0,9	7,8
31	K15+160	CL	16,4	99,8	82,5	47	17	30	12,5	1,83	1,3	5,3
32	K15+760	CH	18,4	97,9	96,0	60	16	44	15,5	1,79	1,8	3,7
33	K16+360	CL	8,8	88,7	52,3	26	16	10	9,0	1,94	0,95	8,2
34	K16+960	CL	10,4	91,1	57,0	43	18	25	10,0	1,94	1,5	6,2
35	K17+560	CL	10,2	98,8	94,4	43	13	30	11,0	1,97	1,6	6,0
36	K18+040	SC	13,8	75,3	24,0	27	13	14	7,0	2,11	1,7	2,1
37	K18+560	CH	13,8	90,6	82,8	54	15	39	12,5	1,81	3,7	4,8
38	K19+400	CH	17,7	92,9	88,4	67	20	47	14,5	1,77	1,4	6,4
39	K19+960	SC	10,6	77,5	33,7	34	15	19	9,8	2,05	8,0	3,2
40	K20+440	SC	10,7	86,9	30,6	24	13	11	8,3	2,00	9,0	0,5
41	K20+720	CL	16,7	96,1	71,4	30	15	15	13,0	1,83	3,1	2,8
42	K21+200	CH	19,1	83,2	75,4	52	19	33	18,0	1,75	2,8	2,9
43	K21+600	CL	16,9	80,8	52,2	34	18	16	11,0	2,00	8,3	0,8
44	K22+120	CL	18,3	96,9	83,8	45	15	30	11,0	1,95	3,6	2,7
45	K22+720	CL	13,0	99,7	85,0	32	17	15	12,0	1,94	3,6	3,7
46	K23+280	CL	15,2	94,3	73,5	37	16	21	11,5	1,91	2,7	4,1
47	K23+720	CH	19,7	100,0	97,7	54	17	37	16,0	1,80	2,1	5,7
48	K24+200	CL	16,7	96,8	91,8	49	18	31	14,0	1,80	2,4	5,6
49	K24+640	CL	18,8	99,7	92,2	39	16	23	11,5	1,93	2,4	4,9
50	K25+480	SC	12,2	83,6	26,1	30	14	16	10,0	1,98	17,0	2,0
51	K25+920	CL	15,3	95,2	83,6	43	18	25	12,5	1,83	1,7	6,3
52	K26+320	CH	24,7	97,3	91,4	54	19	35	18,5	1,83	2,4	3,9
53	K26+960	CL	19,4	99,9	87,1	31	16	15	11,7	1,90	7,6	2,5
54	K27+400	SM - SC	12,5	86,2	47,0	26	19	7	8,5	1,93	18,0	1,4
55	K27+760	ML	20,5	90,3	57,9	NP	NP	NP	9,2	2,00	17,0	1,5

Tabla 9. Muestras seleccionadas y determinación del peso específico

MUESTRA	ABSCISA	IP	PESO ESPECIFICO g/cm³
1	K0+120	15	2.739
14	K6+920	22	2.647
15	K7+080	21	2.637
18	K8+640	15	2.584
22	K10+880	24	2.553
26	K12+920	28	2.508
29	K14+240	20	2.601
31	K15+160	30	2.622
32	K15+760	44	2.705
34	K16+960	25	2.538
38	K19+400	47	2.568
39	K19+960	19	2.594
42	K21+200	33	2.630
44	K22+120	30	2.598
46	K23+280	21	2.504
47	K23+720	37	2.599
48	K24+200	31	2.595
51	K25+920	25	2.603
52	K26+320	35	2.662

5.5.2 Caracterización química

Además de caracterizar físicamente el suelo, es importante realizar un análisis químico que permita detectar la presencia de componentes mineralógicos y elementos químicos que reflejen una mejor identificación de su comportamiento. Con base en estos análisis se puede detectar si el suelo es susceptible a cambios volumétricos o a la concentración de iones, fuente de altos índices de expansión.

5.5.2.1 Análisis por DRX.

Muestra original sin tratamiento (BULK, Normal)

Las muestras fueron tamizadas en malla 400 (38 μ m). El espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral. Mediante el análisis cualitativo realizado por Difracción de rayos-X se determinaron los siguientes minerales:

Las fases encontradas pertenecen a los siguientes grupos:

- Micas: minerales mas opcionales Illita, Mica y Moscovita
- Caolinitas-serpentinatas: minerales mas opcionales Caolinita y Dickita
- Smectitas: minerales mas opcionales Nontronita y Montmorillonita
- Feldespatos: minerales mas opcionales Albita, Microclina y Anortita
- Zeolitas: mineral mas opcional Faujasita
- Cloritas: mineral mas opcional Vermiculita

Tratamientos (químicos y térmicos)

1. Saturación con iones K⁺

La muestra saturada con potasio se dividió en tres partes, una de las cuales se dejó secar al aire, la segunda muestra se calentó a 350°C y la tercera se calentó a 550°C. Mediante el análisis por difracción de rayos-X de las 19 muestras, en 18 de ellas se identificaron los minerales arcillosos montmorillonita, kaolinita e illita, solo en la muestra 1 se identificaron los minerales de montmorillonitas y kaolinita.

2. Saturación con iones Mg^{++}

La muestra saturada con magnesio se dividió en dos partes de las cuales una se dejó secar al aire y la segunda se solvató con etilenglicol. Mediante este tratamiento se pudo corroborar la presencia de montmorillonitas e illitas en las arcillas.

Observaciones:

- Las reflexiones observadas en los difractogramas tomados para los diferentes tratamientos de las arcillas separadas son en su mayoría bandas anchas debido posiblemente a un grado de cristalinidad bajo en las arcillas encontradas.
- Los materiales arcillosos presentes en las muestras analizadas son los identificados a través de los tratamientos realizados a las muestras.

NOTA: Los resultados se relacionan únicamente con las muestras analizadas.

Las vermiculitas, arcillas altamente expansivas, son un derivado del talco (mica) por inserción de hojas de agua molecular en laminas definidas de 4.98\AA de espesor, que es aproximadamente el espesor de dos moléculas de agua; la presencia de iones intercambiables localizados en las capas de agua y la capacidad de la estructura para retener cantidades variables de agua, son parámetros relevantes del material, debido a sus efectos de expansión y contracción.

Las arcillas tipo illita y montmorillonitas, le confieren características de media a alta plasticidad a los suelos al poseer una estructura tipo 2:1 (dos capas de alúmina por una de sílice), permitiendo el intercambio de iones por adsorción

de moléculas de agua. La presencia de estos componentes en las muestras de estudio se relaciona con un alto valor en las propiedades plásticas de los suelos.

La acción de las caolinitas no establece cambios físicos significativos, al ser estables químicamente, con propiedades tales como bajo límite líquido, plasticidad, cohesión, dilatación y contracción, ya que el agua penetra en muy baja proporción para expandir o contraer celdas unitarias

5.5.2.1 Absorción atómica

Los resultados obtenidos por absorción atómica confirman y/o descartan la presencia de ciertos minerales para el análisis por rayos X. Las vermiculitas cálcicas generalmente asocian el ión calcio (Ca) en solución como hidrogenocarbonato de calcio, lo cual las hace más hábiles de hidratarse y en consecuencia expandirse, adquiriendo una configuración semejante a las montmorillonitas.

Los contenidos de silicio y aluminio (Al) se hallan generalmente asociados en la conformación de los diferentes minerales, tipo Albita, Moscovita, y/o espangolita, así como a los respectivos óxidos de los elementos en la formación de las capas de arcillas tipo Caolinita, sin embargo, una parte del aluminio (Al^{+3}), es intercambiable en el suelo por el desbalance de cargas, que hace inestable a los suelos arcillosos.

Los mayores niveles de Al se encuentran en las muestras 26,32,42,38,51, los cuales tienen mayor incidencia de minerales tipo Espangolita y Albita.

Los contenidos de Fe, se relacionan con sus óxidos, el compuesto mas común es la Magnetita, el cual presenta propiedades magnéticas. Minerales de este tipo se presentan en las muestras 18, 14, 15, 46, 47, 38, 44, 34,39.

5.5.2.3 Análisis complementarios

Tabla10. Análisis químicos complementarios.

Muestra	Abscisa	pH saturación	Mat. Org %	CIC meq/100g	SO4 mg/Kg	Al 3+ intercambiable meq/100 gr
1	K0+120	8.0	0.33	32	3	ND
18	K8+640	6.7	0.26	57	3	ND
14	K6+920	5.3	0.74	84	11	ND
52	K26+320	7.7	0.35	74	3	ND
26	K12+920	7.4	0.09	61	5	ND
15	K7+080	7.6	0.20	72	6	ND
22	K10+880	6.6	0.08	54	ND	ND
32	K15+760	7.3	ND	44	3	ND
42	K21+200	7.5	0.41	40	5	ND
46	K23+280	6.1	0.73	60	18	ND
47	K23+720	7.2	0.83	22	4	ND
38	K19+400	7.5	0.32	24	9	ND
44	K22+120	7.0	0.44	70	6	ND
51	K25+920	7.4	0.34	47	3	ND
48	K24+200	7.2	0.87	63	ND	ND
34	K16+960	6.5	0.34	65	4	ND
39	K19+960	7.3	0.76	24	11	ND
31	K15+160	7.1	1.50	67	6	ND
29	K14+240	7.4	0.06	27	4	ND

ND. No Detectable

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) está directamente asociada con la proporción de la fracción arcillosa de carácter expansiva y a la presencia de altos contenidos de materia orgánica (M.O), los cuales alteran moderadamente el valor ácido o base , así como el grado de permeabilidad, donde valores altos de materia orgánica hacen el suelo fácilmente penetrable por el agua.

La CIC se relaciona a su vez con el aluminio (Al^{3+}) intercambiable en el suelo; éste último en altos niveles, produce un desbalance de cargas que hace inestable a los suelos arcillosos. El ion aluminio (Al^{3+}) puede alterar la acción del aditivo, puesto que estos cationes multivalente enlazantes en las intercapas de arcilla pueden ser firmemente retenidos, estableciendo cantidades relativamente mayores de un estabilizante específico.

Los bajos niveles de fracción arcillosa, materia orgánica (M.O) y aluminio intercambiable, tienen poca incidencia en la capacidad de canje; entre tanto la mayor proporción de arcilla expansiva (Illita, Vermiculita, Montmorillonita) y M.O. en las muestras establecen valores más altos en la capacidad de intercambio.

El contenido de aluminio se halla generalmente asociado al óxido de aluminio en la conformación de las capas de arcillas, sin embargo una parte del aluminio (Al^{+3}), es intercambiable en el suelo por desbalance de cargas; en las muestras de suelo analizadas no se detectaron concentraciones de aluminio intercambiable que afecte la estabilidad de los suelos arcillosos.

Altos valores de CIC, materia orgánica, aluminio intercambiable, pH ácido, incrementan la concentración de aditivos estabilizadores en los suelos;

variables que junto con la caracterización del tipo de arcillas expansivas (DRX) presentes, no pueden desconocerse al momento de llevar a cabo la formulación de aditivos estabilizadores de suelos.

5.6 FORMULACION QUIMICA

Con base en la caracterización física y química anteriormente mostrada, se presentan 3 productos químicos para la probable estabilización de las muestras de bajas propiedades físico-mecánicas, se buscará por medio de estos aditivos mejorar las propiedades de estas muestras al disminuir la plasticidad y aumentar la capacidad portante.

Los 3 productos químicos son:

Cal (óxido de calcio al 73.3%)

Silicato de sodio

Cal dolomita (55% carbonato de calcio y 33% carbonato de magnesio).

Los criterios de elección de estos aditivos fueron los siguientes:

- La cal se escogió sobre el cemento porque la cal está más dirigida a mejorar el comportamiento ingenieril de los suelos con características predominantemente finas (arcillas) en comparación con el cemento que está dirigido a suelos granulares, además en las arcillas estabilizadas con cemento se puede presentar el fenómeno de creep (deformación acumulativa).
- La cantidad de materia orgánica para cada muestra a estabilizar es baja <1%, solo en la muestra 31 reporta 1.5% de materia orgánica. Si el suelo fuera muy orgánico se podrían requerir cantidades altas de

aditivos que además de aumentar los costos se podría obtener un bajo efecto en el mejoramiento de los suelos.

- Costos

Tabla 11. Relación aditivo-costos

ADITIVO	COSTOS
Cal (oxido de calcio al 73.3%)	180 \$ /Kg
Silicato de sodio	7000 \$ /Galón
Cal dolomita	130 \$ /Kg

Nota: el costo del cemento es 360 \$ /Kg

- Los 3 productos químicos pueden reaccionar con el suelo por medio de la liberación de iones de calcio, sodio y magnesio, pudiéndose obtener resultados favorables.

5.7 ESTABILIZACION QUIMICA

Para que los resultados de este proceso de estabilización, alcanzaran un nivel optimo de análisis, se realizo un estudio de los mecanismos que se producen en el proceso de mezcla de los estabilizantes –suelo fino y su mejoramiento en las propiedades mecánicas del suelo. Los parámetros para evaluar la efectividad de los aditivos sobre el suelo fueron el índice de plasticidad y la capacidad portante del mismo. La metodología empleada fue la siguiente:

- Cuarteado y tamizado del suelo por el tamiz No. 40
- Mezcla de aditivo con el suelo como porcentaje en peso seco.
- Adaptación y homogenización del suelo a su humedad optima.

- Almacenamiento en frascos sellados para iniciar el proceso de curado.
- Evaluación de límites de Atterberg cada 7 días hasta el día 21.
- Con base en la disminución de la plasticidad a los 14 días de curado, se compactan moldes para la evaluación de C.B.R. de material estabilizado.
- Selección del aditivo y dosificación final.

Para la evaluación de la capacidad portante, se compactaron moldes de 55 golpes, con el fin de simular el porcentaje máximo de compactación obtenido del ensayo de Proctor modificado. Además evaluando este parámetro se obtienen valores reales de resistencia, como dato de entrada al diseño estructural del pavimento.

5.8 EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD PARA LAS MUESTRAS ESTABILIZADAS

Los resultados de seguimiento de la evolución del índice de plasticidad para cada una de las muestras se presentan a continuación:

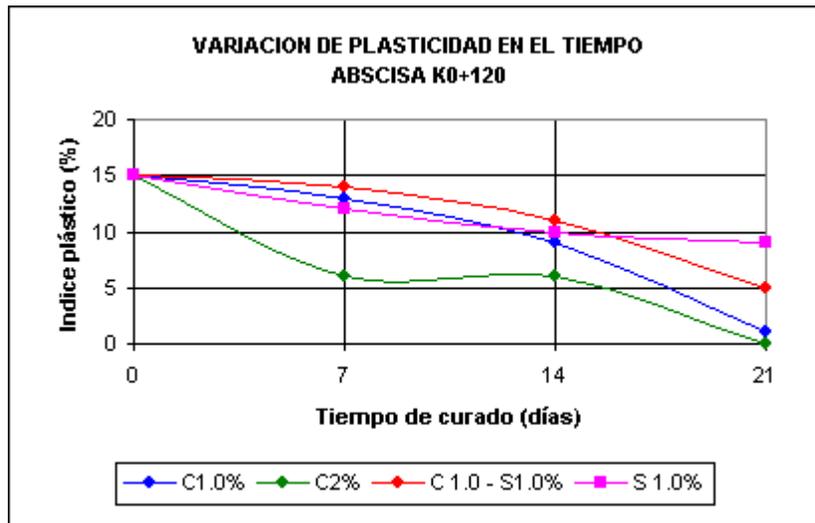
Tabla 12. VARIACIÓN DE LA PLASTICIDAD DE LOS SUELOS EN EL TIEMPO

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		INDICE DE PLASTICIDAD																						CLAS			
		ORIGINAL	CAL 1%			CAL 2%				CAL 1%+S 1%			SILICATO 1%			C2+S1		C3%		C4%	DOL2%		DOL3%		DOL4%		
MUESTRA	ABSCISA	0 DIAS	7 D	14 D	21 D	7 D	14 D	21 D	30 D	7 D	14 D	21 D	7 D	14 D	21 D	21 D	30D	21 D	30D	30D	7D	14D	7D	14D	7D	14D	
1	K0+120	15	13	9	1	6	6	0		11	14	5	12	10	9												SC
14	K6+920	22	16	16	16	10	9	7	7	23	18	17	17	17	17			5	0		14	9					CL
15	K7+080	21	8	8	0	0	0	0		10	9	9	15	17	15						17	11					SC
18	K8+640	15	11	9	9	7	0	0		14	11	11	18	13	7						12	13					CL
22	K10+880	24	20	21	19	12	7	0		26	22	18	23	22	18						22	21					CL
26	K12+920	28	25	23	22	15	10	11	7	25	27	23	32	39	32			8	0								CL
29	K14+240	20	10	12	10	6	6	0		12	19	16	20	21	19						13	14					SC
31	K15+160	30	29	22	21	17	15	15		25	23	26	24	28	25			10	8	0	29	30			26	28	CL
32	K15+760	44	23	24	24	19	14	9		24	33	35	33	38	32	18		8	6	5	28	41			40	33	CH
34	K16+960	25	11	10	0	6	0	0		14	18	14	18	15	15						16	15					CL
38	K19+400	47	36	25	24	19	12	14	14	40	30	29	31	30	29	12		8	0	5	46	44			33	46	CH
39	K19+960	19	15	13	7	9	4	0		12	14	9	18	16	15						18	18					SC
42	K21+200	33	26	25	20	14	10	10		26	26	27	29	25	28	19	14	7	0	7	32	33			25	24	CH
44	K22+120	30	28	19	15	15	10	8	8	24	23	20	30	19	21						28	18					CL
46	K23+280	21	12	12	11	8	8	4		16	12	12	16	15	12			3			14	14	9	7			CL
47	K23+720	37	32	30	22	23	15	13		37	31	26	27	27	30	19		9	7	7	29	36			35	26	CH
48	K24+200	31	32	22	19	19	8	6	6	34	22	21	33	21	20						26	13					CL
51	K25+920	25	22	21	19	9	8	6	6	24	26	20	25	25	22	10											CL
52	K26+320	35	32	24	24	22	16	16		45	38	36	36	40	34	18		11	9	9	29	33	34	35			CH

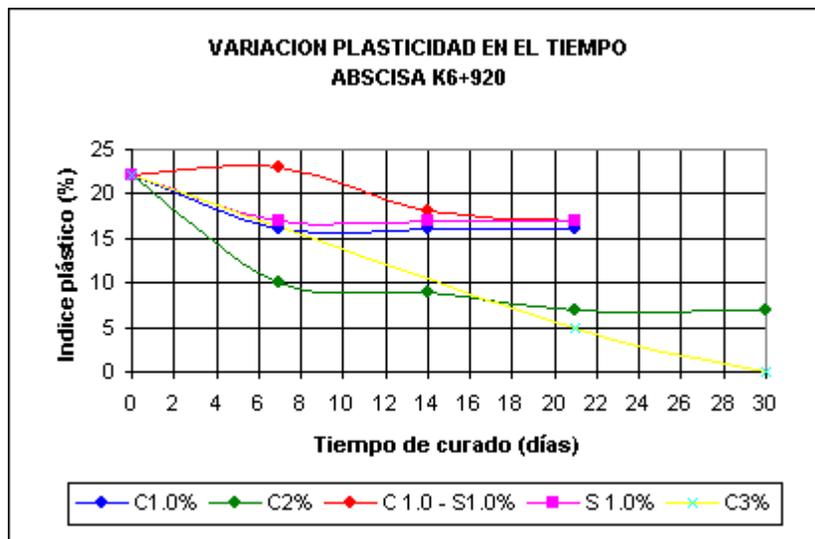
D: Días de curado

5.8.1 Graficas variación índice de plasticidad con diversos productos químicos

Grafica 1. Variación de plasticidad Abs K0+120

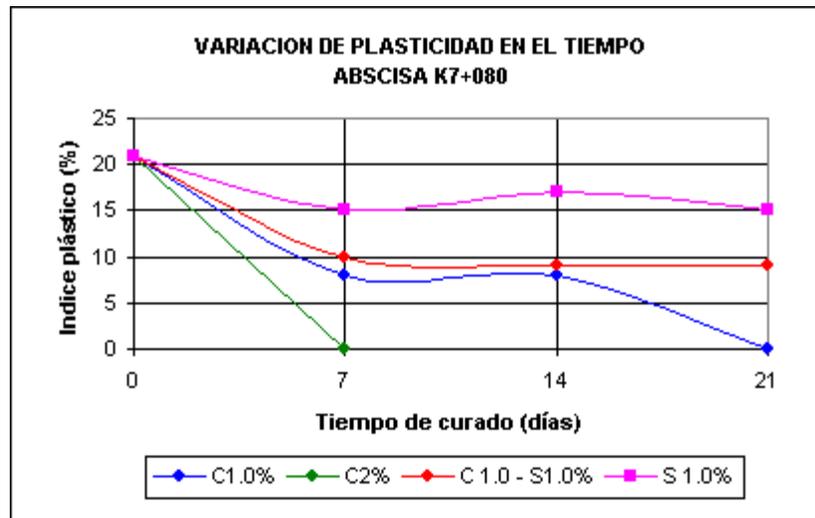


Grafica 2. Variación de plasticidad Abs K6+920

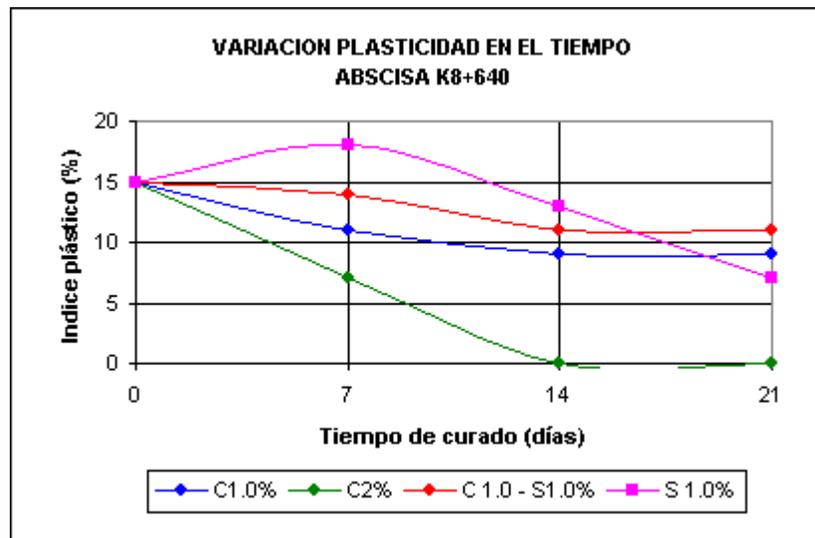


ADITIVOS:
C = OXIDO DE CALCIO
S = SILICATO

Grafica 3. Variación de plasticidad Abs K7+080



Grafica 4. Variación de plasticidad Abs K8+640

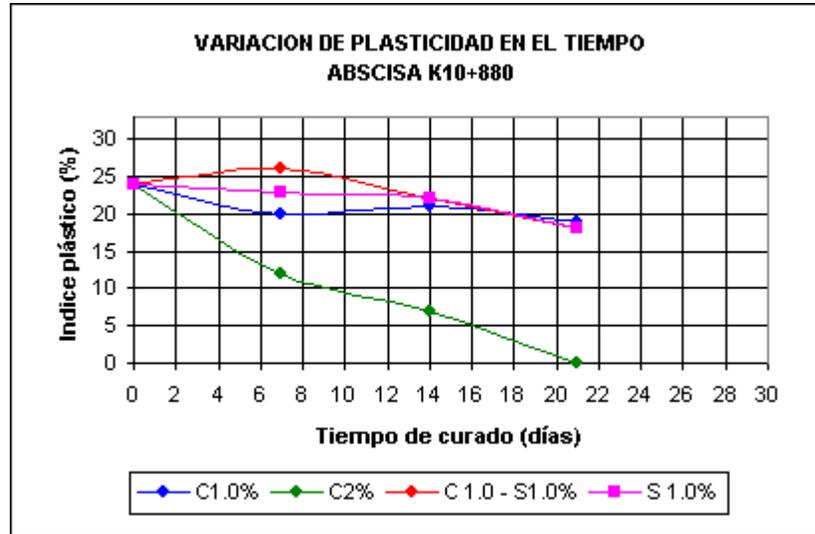


ADITIVOS:

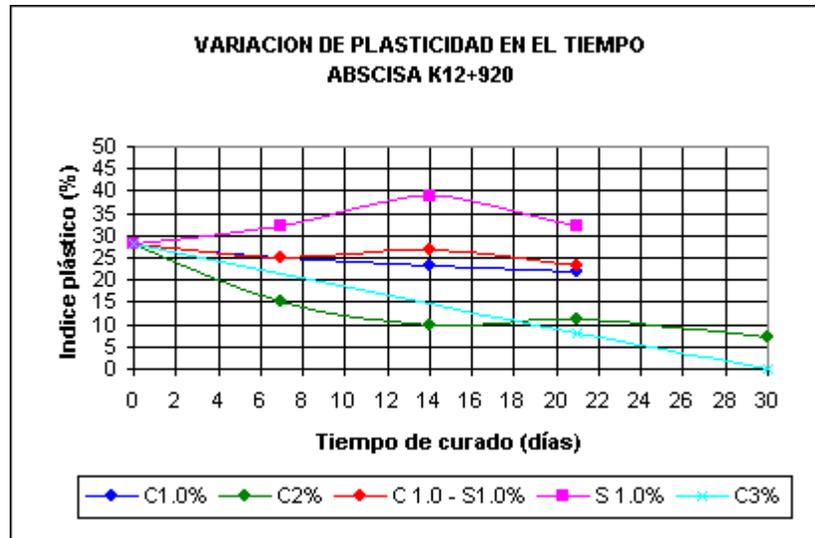
C = OXIDO DE CALCIO

S = SILICATO

Grafica 5. Variación de plasticidad Abs K10+880

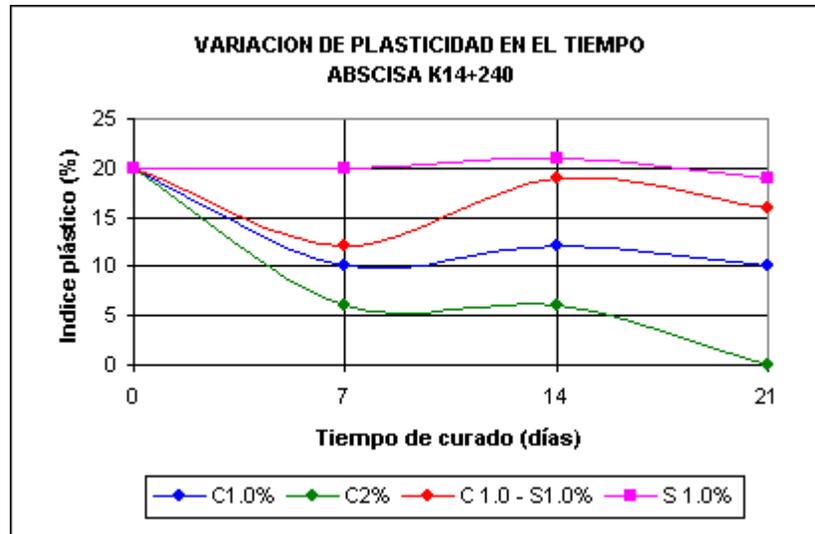


Grafica 6. Variación de plasticidad Abs K12+920

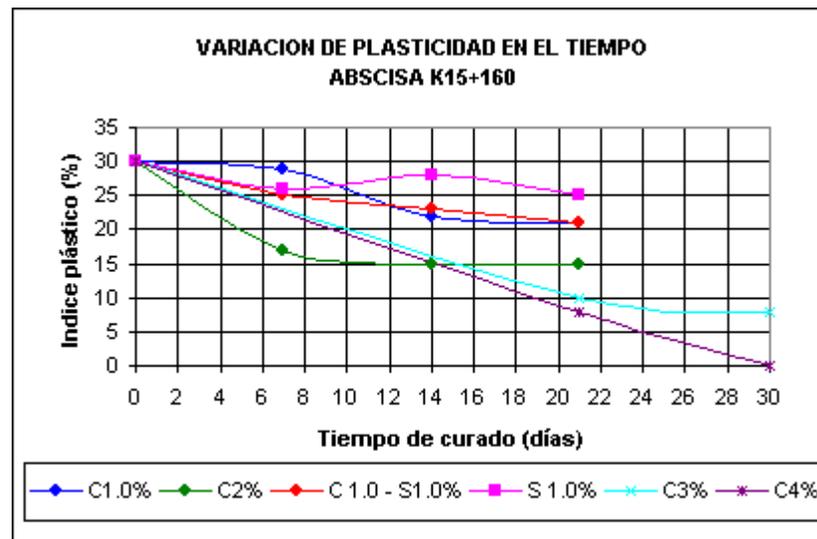


ADITIVOS:
C = OXIDO DE CALCIO
S = SILICATO

Grafica 7. Variación de plasticidad Abs K14+240

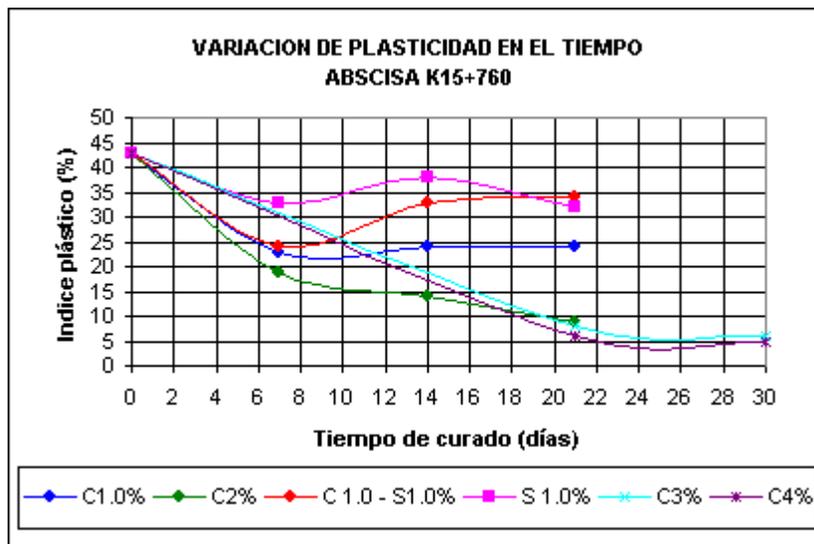


Grafica8. Variación de plasticidad Abs K15+160

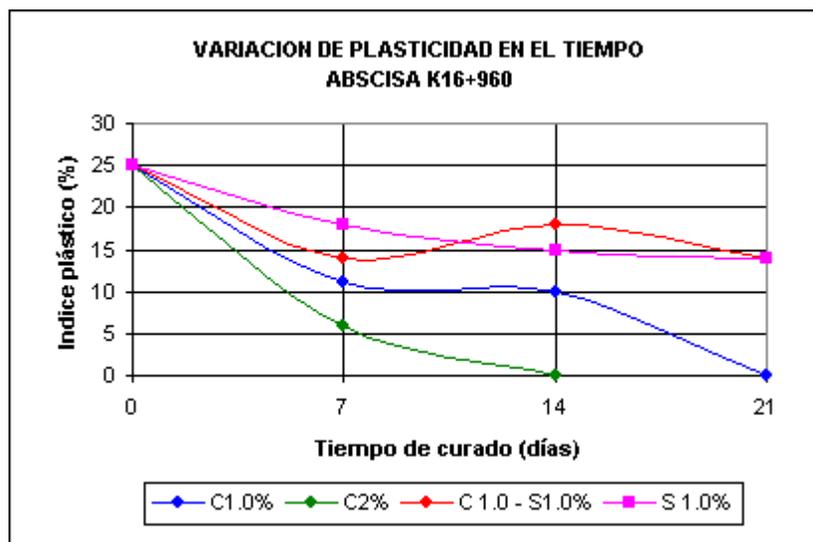


ADITIVOS:
C = OXIDO DE C CALCIO
S = SILICATO

Grafica 9. Variación de plasticidad Abs K15+760



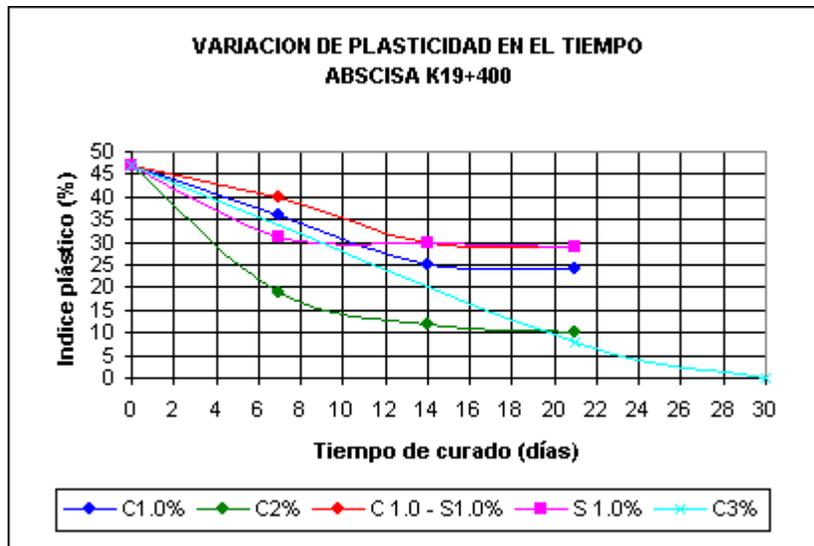
Grafica10. Variación de plasticidad Abs K16+960



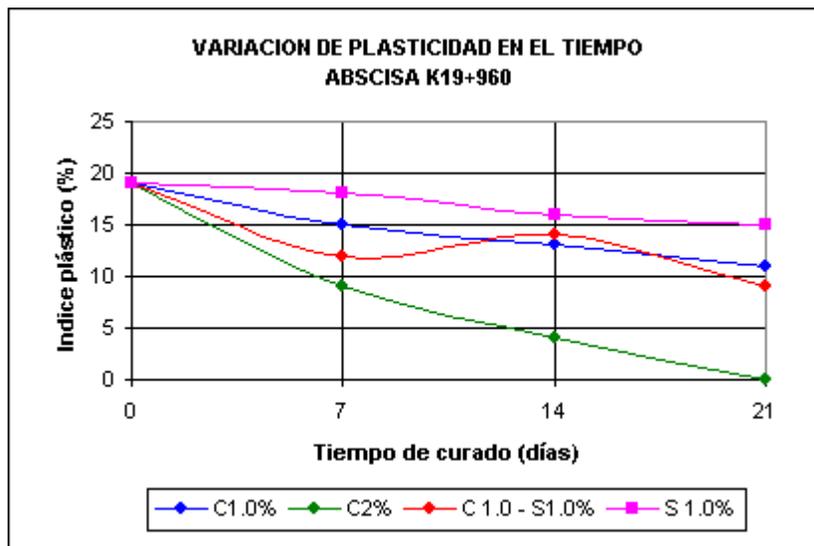
ADITIVOS:
C = OXIDO DE CALCIO

S = SILICATO

Grafica11. Variación de plasticidad Abs K19+400



Grafica 12. Variación de plasticidad Abs K19+960

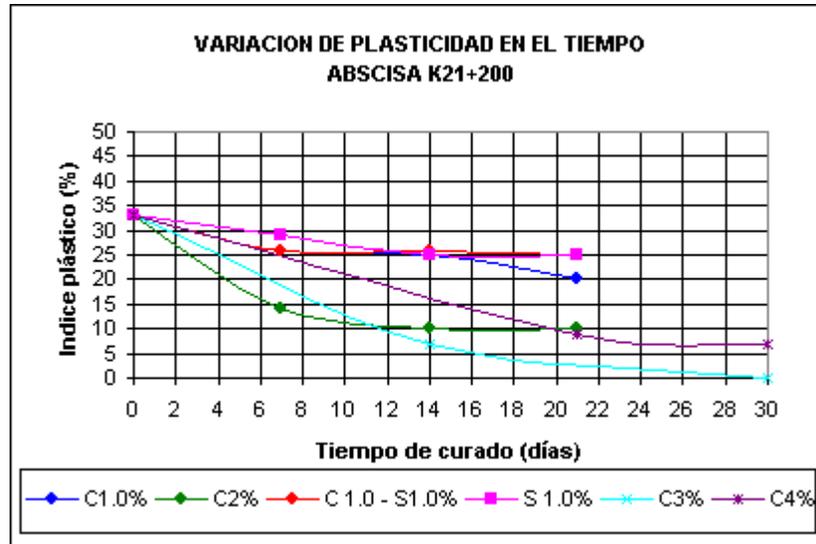


ADITIVOS:

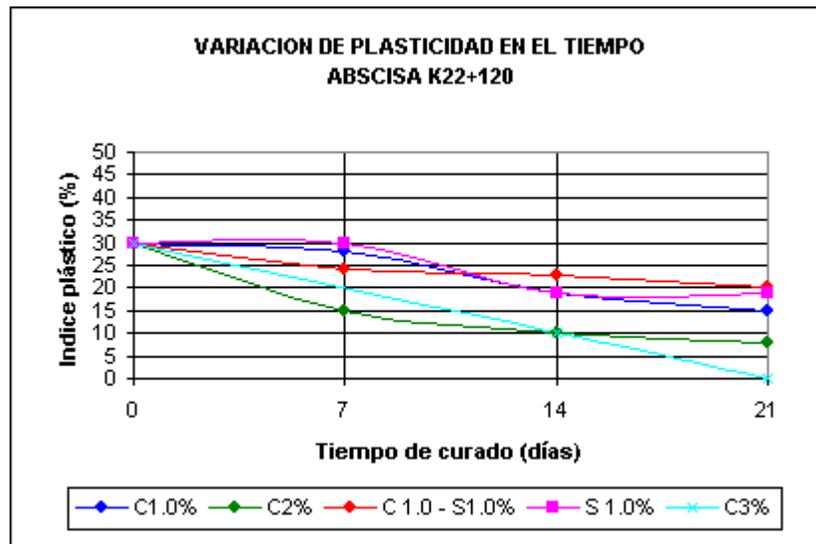
C = OXIDO DE CALCIO

S = SILICATO

Grafica 13. Variación de plasticidad Abs K21+200



Grafica 14. Variación de plasticidad Abs K22+120

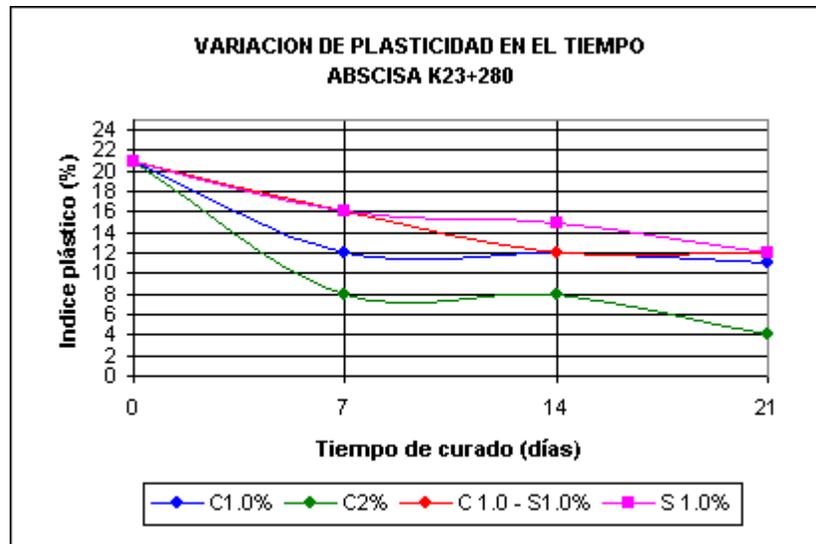


ADITIVOS:

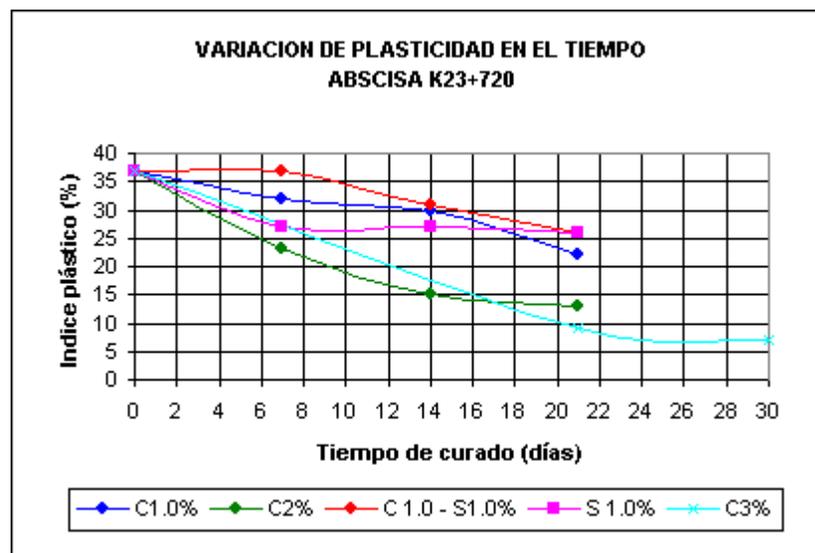
C = OXIDO DE CALCIO

S = SILICATO

Grafica 15. Variación de plasticidad Abs K23+280



Grafica 16. Variación de plasticidad Abs K23+720

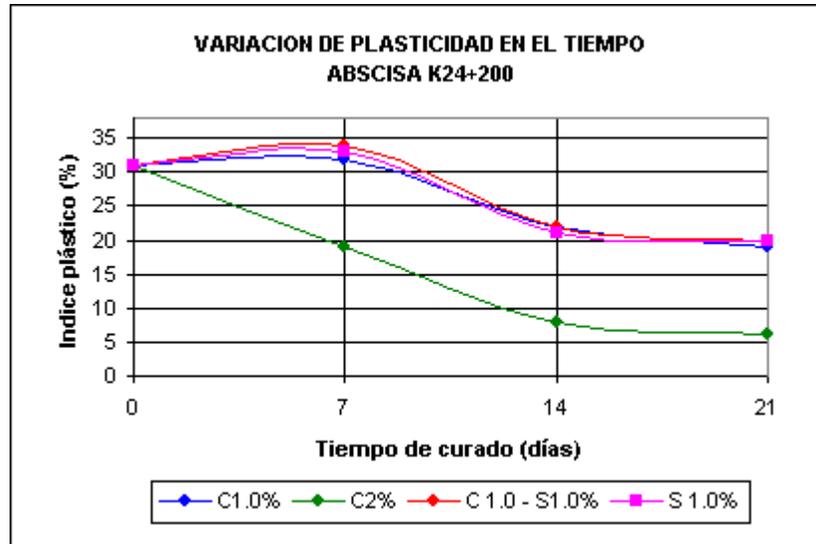


ADITIVOS:

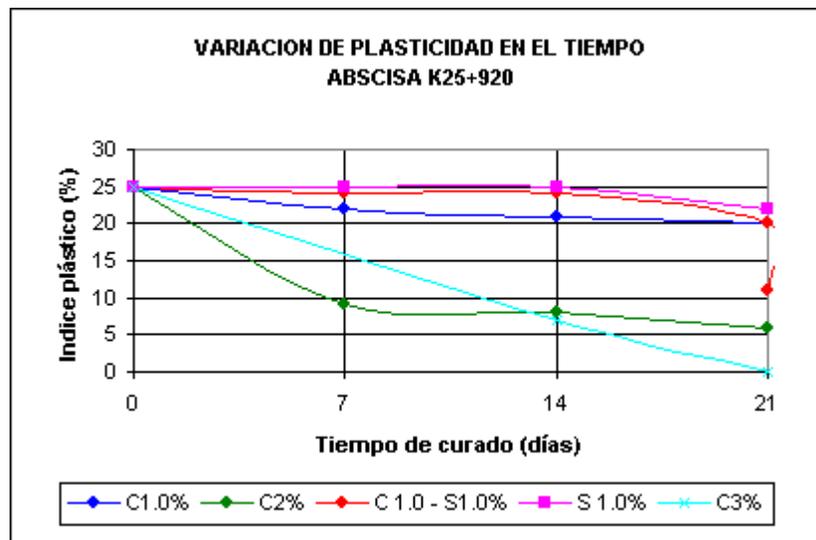
C = OXIDO DE CALCIO

S = SILICATO

Grafica 17. Variación de plasticidad Abs K24+200

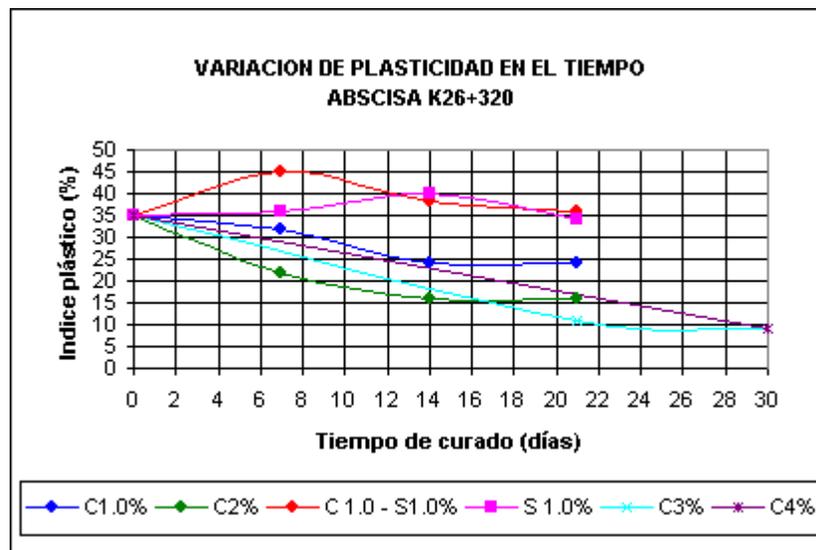


Grafica 18. Variación de plasticidad Abs K25+920



ADITIVOS:
C = OXIDO DE CALCIO
S = SILICATO

Grafica 19. Variación de plasticidad Abs K26+320



ADITIVOS:
C = OXIDO DE CALCIO
S = SILICATO

Por lo tanto el aditivo y la concentración de éste en la muestra que mejor reduce el índice de plasticidad se presentan a continuación:

Tabla 13. Aditivo que mejor disminuye el IP

MUESTRA	ABSCISA	IP INICIAL	ADITIVO	CONCENTRACION (%)	IP FINAL(30 días)
1	K0+120	15	CAL	2	0
14	K6+920	22	CAL	2	7
15	K7+080	21	CAL	2	0
18	K8+640	15	CAL	2	0
22	K10+880	24	CAL	2	0
26	K12+920	28	CAL	3	0
29	K14+240	20	CAL	2	0
31	K15+160	30	CAL	4	0
32	K15+760	44	CAL	4	5
34	K16+960	25	CAL	2	0
38	K19+400	47	CAL	4	5
39	K19+960	19	CAL	2	0
42	K21+200	33	CAL	4	7
44	K22+120	30	CAL	2	8
46	K23+280	21	CAL	3	3
47	K23+720	37	CAL	4	7
48	K24+200	31	CAL	2	6
51	K25+920	25	CAL	2	6
52	K26+320	35	CAL	3	9

5.9 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MUESTRAS ESTABILIZADAS RESPECTO A LA CAPACIDAD PORTANTE

Con base en el aditivo escogido del ítem anterior y su concentración en la muestra se procederá a realizar el ensayo de C.B.R de la siguiente manera:

- Cuarteo y preparación del material

- Adición del aditivo en su correspondiente porcentaje respecto al peso seco del suelo.
- Adición de agua para llevar al suelo a su humedad óptima
- Homogenización del aditivo en el suelo
- Compactación de la muestra a 55 golpes
- Curado de la muestra durante 14 días
- Inmersión en agua durante 4 días
- Evaluación de C.B.R de las muestras

Los resultados del ensayo de C.B.R en las muestras estabilizadas se presentan a continuación:

Tabla 14. C.B.R en las muestras estabilizadas

MUESTRA	ABSCISA	C.B.R 95% DSM Inicial	EXPANSION % INICIAL	ADITIVO	Concentración %	C.B.R 100% DSM FINAL	EXPANSION % FINAL
1	K0+120	4,2	2,4	CAL	2	62	0
14	K6+920	3,7	1,2	CAL	2	92.3	0,2
15	K7+080	4,1	3,6	CAL	2	144.1	0,3
18	K8+640	4,3	2,5	CAL	2	123,9	0,9
22	K10+880	3,1	3,0	CAL	2	84.1	0
26	K12+920	1,1	9,3	CAL	3	24.5	2,8
29	K14+240	2,4	4,3	CAL	2	127.2	0,2
31	K14+160	1,3	5,3	CAL	4	67.5	1,8
32	K15+160	1,8	3,7	CAL	4	97.4	0,8
34	K16+960	1,5	6,2	CAL	2	145.1	0,3
38	K19+400	1,4	6,4	CAL	4	53.5	1,5
39	K19+960	8,0	3,2	CAL	2	182.5	0
42	K21+200	2,8	2,9	CAL	4	92.5	0,8
44	K22+120	3,6	2,7	CAL	2	98.6	0,4
46	K23+280	2,7	4,1	CAL	3	109.6	1,2
47	K23+720	2,1	5,7	CAL	4	50.4	1,4
48	K24+200	2,4	5,6	CAL	2	83.4	0
51	K25+920	1,7	6,3	CAL	2	61.3	0
52	K26+320	2,4	3,9	CAL	3	53.3	0,6

5.10 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LAS MUESTRAS NO ESTABILIZADAS Y ESTABILIZADAS

Tabla 15. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA		CLASIFICACION	IP	CBR 95%DSM	Expansión %	Aditivo SELECCIONADO	IP	CBR 100%DSM Estabilizado	Expansión %
MUESTRA	ABSCISA		Inicial	Inicial	Inicial	(%)	30 días	15 días	Final
1	K0+120	SC	15	4,2	2,4	CAL 2%	0	62	0
14	K6+920	CL	22	3,7	1,2	CAL 2%	7	92.3	0.2
15	K7+080	SC	21	4,1	3,6	CAL 2%	0	144.1	0.3
18	K8+640	CL	15	4,3	2,5	CAL 2%	0	123,9	0,9
22	K10+880	CL	24	3,1	3,0	CAL 2 %	0	84.1	0
26	K12+920	CL	28	1,1	9,3	CAL 3%	0	24.5	2.8
29	K14+240	SC	20	2,4	4,3	CAL 2%	0	127.2	0.2
31	K14+160	CL	30	1,3	5,3	CAL 4%	0	67.5	1.8
32	K15+60	CH	44	1,8	3,7	CAL 4%	5	97.4	0.8
34	K16+960	CL	25	1,5	6,2	CAL 2%	0	145.1	0.3
38	K19+400	CH	47	1,4	6,4	CAL 4%	5	53.5	1.5
39	K19+960	SC	19	8,0	3,2	CAL 2%	0	182.5	0
42	K21+200	CH	33	2,8	2,9	CAL 4%	7	92.5	0.8
44	K22+120	CL	30	3,6	2,7	CAL 2%	8	98.6	0.4
46	K23+280	CL	21	2,7	4,1	CAL 3%	4	109.6	1.2
47	K23+720	CH	37	2,1	5,7	CAL 4%	7	50.4	1.4
48	K24+200	CL	31	2,4	5,6	CAL 2%	6	83.4	0
51	K25+920	CL	25	1,7	6,3	CAL 2%	6	61.3	0
52	K26+320	CH	35	2,4	3,9	CAL 3%	9	53.3	0.6

5.11 DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO POR TRAMOS HOMOGÉNEOS

Para la vía en estudio se procederá a distribuir el aditivo y su concentración a lo largo de toda su extensión de 28 Km. Con base en los siguientes criterios:

- Resultados de la caracterización física y estabilización química
- Semejanzas de características entre los tramos de la vía

Por lo tanto la dosificación del aditivo será de la siguiente manera:

Tabla 16. Dosificación del Aditivo

MUESTRA	ABSCISA	CLASIFICACION SUCS	MUESTRAS ESTABILIZADAS	DOSIFICACION CAL
1	K0+120	SC	CAL2%	2
2	K0+560	SC	-	2
3	K1+240	SC	-	2
4	K1+840	SM	-	2
5	K2+040	SM	-	2
6	K2+920	SM	-	2
7	K3+400	SM	-	2
8	K3+800	SM	-	2
9	K4+320	SP - SM	-	2
10	K4+880	SM	-	2
11	K5+400	SM - SC	-	2
12	K5+880	SM	-	2
13	K6+320	SP	-	2
14	K6+920	CL	CAL2%	2
15	K7+080	SC	CAL2%	2
16	K7+600	SC	-	2
17	K8+320	SM - SC	-	2
18	K8+640	CL	CAL2%	2
19	K9+120	SM	-	2
20	K9+880	CL	-	4
21	K10+440	CL	-	4
22	K10+880	CL	CAL2%	4
23	K11+360	SC	-	2
24	K11+640	SC	-	2
25	K12+400	CL	-	4
26	K12+920	CL	CAL 3%	4
27	K13+120	SM - SC	-	2

28	K13+880	SC	-	2
29	K14+240	SC	CAL2%	2
30	K14+920	CL	-	4
31	K15+160	CL	CAL 4%	4
32	K15+760	CH	CAL 4%	4
33	K16+360	CL	-	4
34	K16+960	CL	CAL2%	4
35	K17+560	CL	-	4
36	K18+040	SC	-	4
37	K18+560	CH	-	4
38	K19+400	CH	CAL 4%	4
39	K19+960	SC	CAL2%	4
40	K20+440	SC	-	4
41	K20+720	CL	-	4
42	K21+200	CH	CAL 4%	4
43	K21+600	CL	-	4
44	K22+120	CL	CAL2%	4
45	K22+720	CL	-	4
46	K23+280	CL	CAL 3%	4
47	K23+720	CH	CAL 4%	4
48	K24+200	CL	CAL2%	4
49	K24+640	CL	-	4
50	K25+480	SC	-	4
51	K25+920	CL	CAL2%	4
52	K26+320	CH	CAL 3%	4
53	K26+960	CL	-	2
54	K27+400	SM - SC	-	2
55	K27+760	ML	-	2

5.12 DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA ESTABILIZACION

Para cuantificar el espesor de la subrasante de la vía que requiere ser sometido al proceso de estabilización química, con el fin de aumentar su capacidad portante, se realizó un diseño con base en la carga que deberá soportar la vía durante un periodo de servicio (10 años) .Para tal fin, se realizó un estudio de tránsito de la vía y un diseño estructural basado en límites admisibles de esfuerzos y deformaciones de materiales

5.12.1 Estudio de tránsito

La información se realizó mediante un aforo, obteniéndose:

Tabla 17. Conteo de vehículos

DIA	AUTO	BUS	C-2 G	C-3	C-4
30/11/2003	88	21	17	16	1
01/12/2003	89	19	27	19	
02/12/2003	30	13	15	11	
03/12/2003	22	12	12	13	
04/12/2003	77	21	24	16	2
05/12/2003	66	18	16	15	2
06/12/2003	31	10	9	10	2
SUMA	403	114	120	100	7

Asumiendo los factores de equivalencia propuestos por la Universidad del Cauca, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 18. Factores de equivalencia

Vehículos Comerciales	Factor de Equivalencia
Buses	1
C-2 pequeño	1,14
C-2 grande	3,44
C-3	3,76
C-4	6,73

Teniendo en cuenta que la zona de influencia del proyecto se caracteriza por ser agrícola, ganadera y turística con un posible crecimiento anual del 3% y asumiendo un porcentaje de aumento del 20% del N, por tránsito atraído y generado, se obtiene para un periodo de servicio de 10 años:

N diseño = 842.000 Ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

5.12.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA EN EL SOFTWARE DEPAV

La estructura que recibirá el paso de los vehículos estará conformada por una capa de subrasante en su estado natural, una capa de subrasante estabilizada cuyo espesor se calcula a continuación.

Además se asumieron las características del material de subrasante más desfavorable, en cada uno de los tramos presentes en la vía en estado natural, para garantizar que ningún tramo quede subdiseñado.

Para obtener el valor de Mr de la subrasante estabilizada, se tuvo en cuenta el valor del C.B.R estabilizado evaluado a los 15 días de curado con el aditivo estabilizador.

Tabla 19. Relación abscisa y modulo elástico

ABSCISAS	Modulo Elástico Subrasante (Kg/cm²)	Modulo Elástico Capa Estabilizada (Kg/cm²)
K0+000 a k9+000	370	6200
K9+000 a k11+000	160	8400
K11+000 a k12+000	500	8400
K12+000 a k13+000	110	2450
K13+000 a k14+500	240	12700
K14+500 a k26+500	130	5040
K26+500 a k28+000	240	5330

*Los módulos elásticos fueron calculados a partir de la ecuación empírica $100 \cdot \text{CBR}$ y módulos de Poisson de 0.45 y 0.4 para subrasante y capa estabilizada respectivamente.

Siguiendo el criterio del método de Shell para diseño de pavimentos flexibles, la deformación a compresión admisible para un 95% de confiabilidad en la superficie de la subrasante natural es:

$$\epsilon_v \text{ admisible} = 1.8 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25}$$

$$\epsilon_v \text{ admisible} = 0.00059$$

Del cálculo realizado en el programa DEPAV, se obtienen las siguientes deformaciones y el espesor requerido para la estabilización:

Tabla 20. Relación abscisa y espesor de capa

ABSCISAS	ϵ_v	Espesor de capa a estabilizar (cm)
K0+000 a k9+000	0,00045	30
K9+000 a k11+000	0,00055	40
K11+000 a k12+000	0,00058	30
K12+000 a k13+000	0,00059	50
K13+000 a k14+500	0,00059	50
K14+500 a k26+500	0,00058	50
K26+500 a k28+000	0,00038	40

5.13 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

A continuación se presenta las diferentes actividades que hacen parte en el proceso de estabilización química:

- Definición de los parámetros de control (Densidades máximas, humedades óptimas, porcentaje de dosificación de aditivo).

Foto 1. Aspecto inicial de la vía



5.13.1 Escarificación del material de subrasante natural

De acuerdo al espesor definido en el diseño de la estructura. Esta etapa se realiza empleando motoniveladora y/o retroexcavadora si se encuentra presencia de sobre tamaños en la vía.

Foto 2. Escarificación con motoniveladora



Foto 3. Escarificación con retroexcavadora



5.13.2 Extendido del material

Extendido del material en la vía con motoniveladora, para iniciar la aplicación del aditivo.

Foto 4. Extendido del material



5.13.3 Ubicación y aplicación del aditivo estabilizador

Esta etapa se lleva a cabo, ubicando cada saco de cal a lado y lado de la banca, con igual distancia de espaciamiento dependiendo de la longitud del tramo que se trabaje. Se debe garantizar una distribución, tal que la dosificación sea uniforme, abriendo cada saco y extendiendo manualmente el material, de tal forma que se cubra toda la superficie del suelo.

Foto 5. Ubicación y aplicación del aditivo estabilizador fase1



Foto 6. Ubicación y aplicación del aditivo estabilizador fase 2



5.13.4 Mezclado del suelo con el aditivo previamente extendido

Se realiza con motoniveladora, permitiendo la homogenización del material y luego el extendido del suelo para acondicionarlo a su humedad óptima de compactación.

Foto 7. Mezclado del suelo con el aditivo fase 1



Foto 8. Mezclado del suelo con el aditivo fase 2



Foto 9. Mezclado del suelo con el aditivo fase 3



Foto10. Mezclado del suelo con el aditivo fase 4



5.13.5 Adición del contenido de agua

Se adiciona el contenido de agua necesario para adecuar el suelo en su humedad óptima, empleando carrotanque irrigador.

Foto11. Adición del contenido de agua empleando tanque irrigador fase 1



Foto12. Adición del contenido de agua empleando tanque irrigador fase 2



5.13.6 Mezclado de material

Mezclado de material con el contenido de humedad óptima empleando motoniveladora y perfilado para preparar la compactación.

Foto13. Mezclado de material empleando motoniveladora fase 1



Foto14. Mezclado de material empleando motoniveladora fase 2



Foto15. Mezclado de material empleando motoniveladora fase 3



5.13.7 COMPACTACIÓN DE LA CAPA EN FRANJAS

Con espesor no mas de 15 cm. del material preparado mediante la aplicación de energía con vibrocompactador, hasta obtener un 98% de la máxima densidad seca.

Foto16. Compactación de la capa en franjas empleando vibrocompactador fase 1



Foto17. Compactación de la capa en franjas empleando vibrocompactador fase 2



5.13.8 Control del proceso

Mediante medición de densidades con ensayos de campo.

Foto18. Medición de densidades con ensayos de campo.



5.13.9 Colocación de una superficie protectora

Es necesario sobreponer una capa impermeable, inicialmente un riego de liga y finalmente se puede realizar la aplicación de un tratamiento superficial o capa de sello con crudo o emulsión asfáltica, que aumente el confort al desplazarse por la vía y proteja la capa estabilizada de los efectos degradantes del ambiente.

Foto19. Imprimación



Foto 20. Slurry-seal

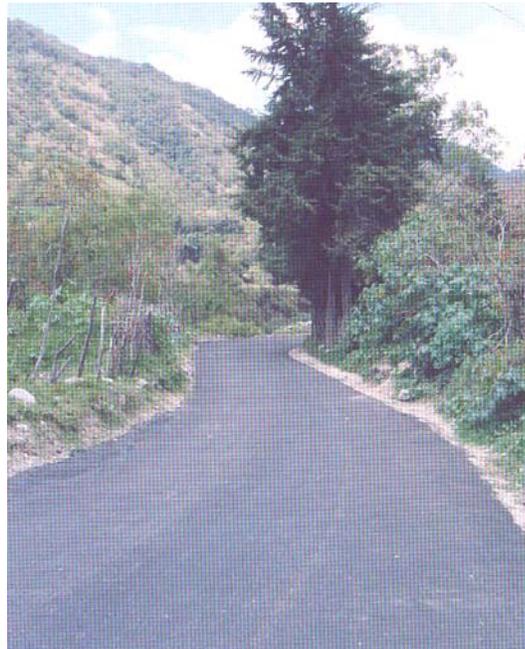
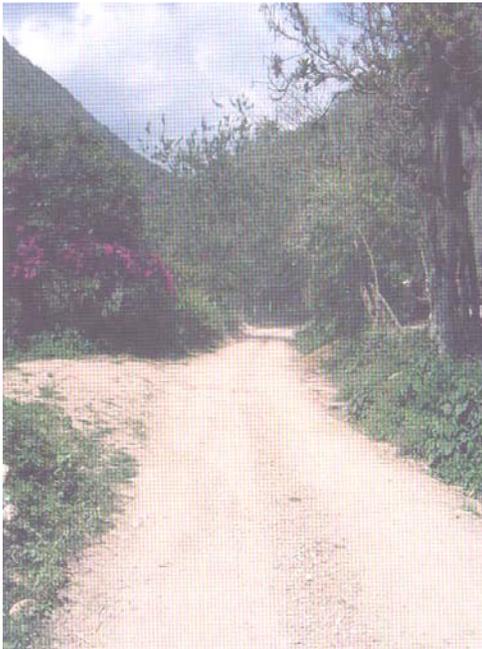


5.13.10 Curado

Con un tiempo mínimo de 15 días

5.13.11 Comparación del aspecto inicial y final de la construcción de la vía

Foto 21. Aspecto inicial de la vía Foto 22. Aspecto final de la vía



6. CONCLUSIONES

- La investigación se presentó como una alternativa de solución para aumentar y mejorar la malla vial colombiana a nivel rural para traer consigo beneficios a nivel económico, social, político y cultural, igualmente puede servir como guía a entes públicos, privados, fundaciones, ONG y a la comunidad en general que quieran contribuir a impulsar el desarrollo de determinada región.
- Los resultados de campo mostraron una deflexión Benkelman característica de 1.59 mm, para una confiabilidad del 95%; además, se presentaron valores de CBR asociado comprendidos entre 0.6% y 20.9%. Las magnitudes de modulo resiliente encontradas osciló entre 282 Kg/cm² y 990 Kg/cm². Todos estos parámetros caracterizan al material de subrasante con una capacidad estructural baja en la vía, justificándose su mejoramiento con el proceso de estabilización química, a través del cual se disminuyen las deflexiones presentes, la susceptibilidad a cambios volumétricos y se aumenta la capacidad portante del suelo.
- A partir de la caracterización física inicial del suelo, la subrasante tiene una humedad natural en campo entre 2.8% y 28.6%. Utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), la mayoría de los materiales se clasifican como arenas con contenidos significativos de arcillas y limos (SC, SM), y arcillas de media y alta plasticidad (CL, CH). Estos suelos poseen índices de plasticidad que varían entre el no plástico (NP) y el 21% para el caso de los SM, SC, del 31% para el CL y del 47% para el CH. Las densidades secas máximas oscilaron entre 1.69 g/cm³ y 2.11 g/cm³ para los cuales las humedades óptimas

fueron de 19.5% y 7% respectivamente. Del ensayo de CBR se tiene que para el 95% de la densidad máxima seca del suelo, la capacidad de soporte varia entre 0.9% y 46% y la expansión de las diferentes muestras estuvieron entre 0% y 9.3%. Estos valores representan una capacidad estructural de magnitud media para un material constituyente de subrasante. Con el proceso de estabilización química, se logra mejorar considerablemente estos parámetros, generando la composición de una capa resistente y durable.

- Con base en la caracterización química del material de subrasante, se encontró que los suelos presentan valores de pH entre 5.3 y 8, contenido de materia orgánica entre 0.06% y 1.5% , tales ensayos nos pueden dar una idea sobre el efecto y dosificación de cierto aditivo ya que a valores altos de materia orgánica junto valores ácidos de pH nos sugeriría usar mayor dosificación de cierto aditivo , respecto a la capacidad de intercambio cationico oscilo entre 22 y 84 meq/100g sirviendo de guía para identificar el mineral arcilloso que se presenta en el suelo y darle su correspondiente tratamiento. Se detectaron componentes mineralógicos que generan efectos expansivos y cambios volumétricos al entrar en contacto con el agua. Esto genera la necesidad de realizar una estabilización química con el objeto de aumentar la resistencia del suelo y disminuir al máximo la plasticidad de los suelos evitando así un deterioro prematuro de alguna estructura vial que se coloque sobre la subrasante.
- De la evaluación de los agentes estabilizadores con base a la dosificación planteada, se determino que el aditivo mas eficaz corresponde al ion calcio (cal viva) con 73.3 % de oxido de calcio en una dosificación que varia entre 2% y 4% , presentando una disminucion de 42 puntos en el mayor índice de plasticidad que se presento en la muestra No.38 abscisa K19+400 la cual disminuyo de 47% a 5% y en todas las muestras el índice de plasticidad oscilo entre 0% y 9 % al final del proceso de curado también mejoro la menor capacidad portante que se presento en la muestra No.26, abscisa K12+920 la

cual aumento de 1.1% a 24.5% a los 15 días de curado, se obtuvo una media en el aumento de la capacidad portante de 3623% en todas las muestras estabilizadas reportando los siguientes aumentos:

MUESTRA	MAYOR CAMBIO C.B.R (%)	AUMENTO %
SC	2.4 a 127.2	5300
CL	1.5 a 145.1	9673
CH	1.8 a 97.4	5411

Luego los mayores aumentos en la capacidad portante causados por la cal viva se presentaron en el siguiente orden grupo CL, seguido de CH y SC.

- Referente al porcentaje de expansión la cal viva disminuyo valores que oscilaron entre 1.2% y 9.3% reduciéndolos a valores entre 0% y 2.8%.
- Respecto a la disminución del índice de plasticidad el segundo mejor aditivo después de la cal viva fue la cal dolomita y por ultimo el silicato de sodio, aunque se pudo observar cualitativamente que el silicato de sodio le da mejor manejabilidad a la muestra.
- De las 19 muestras a estabilizar 4 muestras fueron SC, 10 muestras fueron CL y 5 muestras fueron CH ,encontrándose:
 Para las 4 muestras SC: todas se estabilizaron con 2% de cal viva
 Para las 10 muestras CL: 7 de ellas se estabilizaron con 2% de cal viva ,
 2 muestras se estabilizaron con 3% de cal viva y la muestra restante se estabilizo con un 4% de cal viva .
 Para las 5 muestras CH: 4 muestras se estabilizaron con 4% de cal viva y la restante con 3% de cal viva.

De lo anterior se puede obtener el siguiente rango de dosificación de cal viva:

MUESTRA	RANGO DE DOSIFICACION DE CAL VIVA
SC	2%
CL	2% a 3%
CH	4%

Nota: Este rango de aplicación es propio de los suelos de esta vía, por tanto no ha de generalizarse a otros SC, CL, CH de cualquier otra vía ya que puede presentarse cambios a nivel químico.

- Con base en el estudio de tránsito realizado y el diseño de la capa a estabilizar, el espesor de esta oscila entre **0.3 y 0.5 m**, dependiendo del tramo de trabajo.
- Respecto al trabajo en obra la vía en estudio deberá conformarse con bombeo del 3%, para facilitar el flujo de aguas de escorrentía y evitar la saturación de la subrasante, se deben construir cunetas a lo largo de la vía, de igual forma se menciona que en la vía se deben garantizar las obras de arte necesarias y la estabilización de zonas de posibles deslizamientos con el fin de proteger el trabajo realizado y la durabilidad del tramo, también es fundamental realizar el proceso de imprimación inmediatamente después de compactar la capa estabilizada, con el fin de proteger la estructura de los efectos climáticos y del tránsito.

7. RECOMENDACIONES

- Plantear otros agentes estabilizadores que sean más económicos que la cal viva y con resultados iguales o mejores respecto a la disminución del índice de plasticidad, aumento de la capacidad portante y reducción de expansión.
- Realizar un proceso de estabilización similar a éste pero enfocado a suelos granulares en vías rurales para contar con un procedimiento guía para aquellas instituciones que quieran promover el desarrollo de cierta región
- Realizar una norma donde se especifique el procedimiento para la estabilización físico-química para la conformación de subrasantes de vías rurales con base en resultados de campo y de laboratorio
- Investigar, plantear más proyectos que contribuyan a aumentar y/o mejorar la infraestructura vial rural de nuestro país.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ARDILA, Carlos D. Evaluación y caracterización mecánica de suelos arcillosos estabilizados químicamente, 1959.

CARRILLO M, Luis F. Tesis de grado, Estudio de arcillas de rocas sedimentarias mediante DRX, 1985.

CUERVO, Darío, MERCHAN, Rodrigo, SANTOS, German, SARMIENTO, Eduardo, SILVA, Maria I. La crisis de la infraestructura vial, 1996.

GOMEZ R. Roberto, Tesis de grado, Arcillas residuales expansivas de San Gil, 1982.

HANDY, Richard y SPANGLER, Merlin. Soil Engineering, 1978.

JOURNAL OF THE GEOTHECNICAL ENGINEERING, division ASCE Vol. 100 N. 1-6, 1974.

JOURNAL OF THE SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS, division ASCE Vol. 85 N. 1-3, 1959

JUAREZ, Badillo, E. Mecánica de suelos, 1967.

KEZDI, A. Stabilized earth roads, 1984.

MANTILLA D. Guillermo, SLEBY P. Carlos J. Tesis de grado, Estudio sobre arcillas expansivas, 1977.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Bucaramanga, Empleo de emulsiones asfálticas en pavimentación de carreteras, 1985.

MOORE, Duane M. X-RAY Diffraction and the identification and analisis of clay mineral, 1997.

RICO, del Castillo. La ingeniería de suelos en las vías terrestres, 1974.

SCOTT, Ronal F. Principles of Soil Mechanics, 1968.