



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**INVESTIGACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ENZIMA
APLICADO A LA SUB-RASANTE DE LA AVENIDA QUITUMBE - ÑAN,
CANTÓN QUITO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

OPCIÓN: CAMINOS

AUTOR: CEDEÑO PLAZA DAVID GABRIEL

TUTOR: ING. JUAN CARLOS ÁVILA ARMIJOS

QUITO – ECUADOR

2013

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo incondicional que me brindaron en toda la carrera universitaria, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles, y porque el orgullo que sienten por mi, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

A mi esposa y a mi hermano que han sido mis compañeros en todos los días de lucha para salir adelante en este trabajo.

Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Mis palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme brindado la fortaleza para poder salir de los momentos difíciles en toda la carrera universitaria.

A la Universidad Central del Ecuador, por la formación profesional.

Al Ing. Juan Carlos Ávila, tutor de tesis, que supo colaborar con el desarrollo de la tesis de manera desinteresada.

A los Ingenieros Ernesto Ortiz y Fabián Durango por su colaboración formando parte de la revisión y calificación del presente trabajo.

Al personal del laboratorio de suelos de la EPMMOP-Q, que supieron colaborar con su experiencia en el desarrollo de esta investigación.

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo, CEDEÑO PLAZA DAVID GABRIEL, en calidad de autor del trabajo de investigación o tesis realizada sobre: "INVESTIGACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ENZIMA APLICADO A LA SUB-RASANTE DE LA AVENIDA QUITUMBE- ÑAN, CANTÓN QUITO.", por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de lo que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Quito, lunes 07 de Octubre de 2013



David Gabriel Cedeño Plaza

C.C. 0802769489

CERTIFICACIÓN

En calidad de Revisor del Proyecto de: INVESTIGACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ENZIMA APLICADO A LA SUB-RASANTE DE LA AVENIDA QUITUMBE - ÑAN, CANTÓN QUITO., presentado y desarrollado por el señor DAVID GABRIEL CEDEÑO PLAZA, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, considero que el proyecto reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 24 días del mes de Octubre del 2013.

Atentamente:



Ing. Juan Carlos Ávila Armijos

TUTOR

INFORME DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

TEMA: INVESTIGACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ENZIMA APLICADO A LA SUB-RASANTE DE LA AVENIDA QUITUMBEÑAN, CANTÓN QUITO.

ANTECEDENTES

El Sr. Director de la Carrera de Ingeniería Civil, por disposición del Decano de la Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemáticas, autoriza la denuncia de tesis presentada por el señor DAVID GABRIEL CEDEÑO PLAZA, y se me designa como tutor.

DESARROLLO DE LA TESIS

Se realizaron ensayos de laboratorio inherentes a la Mecánica de Suelos con el material proveniente de la zona de estudio para determinar sus propiedades físicas y mecánicas, determinando el porcentaje óptimo para cada una de las mezclas de suelo con estabilizante.

CONCLUSIÓN

- Se demostró que se puede estabilizar este tipo de materiales finos deficientes con enzimas orgánicas, cemento y emulsión asfáltica.
- Los porcentajes de estabilización óptimos que cumplen con la estabilización propuesta son los siguientes:
 - Para la sub-rasante estabilizada con enzima orgánica la dosificación óptima es de 1lt para 30m³
 - Para la sub-rasante estabilizada con cemento, el porcentaje óptimo con relación al peso es de 9%

- Para la sub-rasante estabilizada con emulsión asfáltica CSS – 1h, el porcentaje óptimo con relación al peso es de 8%
- Demostrando los beneficios de la estabilización del suelo utilizado, se constata que el aporte de cada uno de los agentes estabilizantes utilizados aportan satisfactoriamente.
- De acuerdo al análisis del presupuesto elaborado para cada uno de los procedimientos de estabilización, el menor costo es la estabilización con cemento, cuyo valor es \$ 64,339.20.

En virtud a lo manifestado anteriormente, las actividades desarrolladas han sido satisfactorias y los resultados obtenidos en el transcurso del desarrollo del mismo son los esperados, emito mi aprobación a este trabajo de tesis y recomiendo proseguir el trámite respectivo hasta la graduación del ejecutor.

Atentamente:



Ing. Juan Carlos Ávila Armijos

TUTOR

Hoja de calificaciones



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA, CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICA
 SECRETARIA

RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

CARRERA DE Ingeniería Civil

Quito, 19 de Julio de 2013

Señor Cedeño Plaza David Gabriel

Tema: Investigaciones de la estabilización de suelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la avenida Dujansbe - Nan cantón Quito

CALIFICACIÓN:

TRIBUNAL	PROFESOR (A)	NOTA SOBRE VEINTE		FIRMA
		NUMERO	LETRAS	
PROFESOR TITULAR	ING. FABRIZO TURANO	20	veinte	[Firma]
PROFESOR TITULAR	ING. Ernesto Ortiz	19	diez y nueve	[Firma]
PROMEDIO		19.5	diecinueve y medio	[Firma]

[Firma manuscrita]

Dra. Kathyne Carrión Valdivieso
 SECRETARIA ABOGADA (E)

CONTENIDO

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
INFORME DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN	VI
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 INTRODUCCIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.4 JUSTIFICACIÓN	6
1.5 ALCANCE	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1 DEFINICIÓN DE SUELO	8
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS	10
2.2.1 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO	10
2.2.2 FORMACIÓN	12
2.2.3 ESTRUCTURA	15
2.3 PROPIEDADES ÍNDICE	18
2.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD	18
2.3.2 GRANULOMETRÍA	19
2.3.3 LÍMITE LÍQUIDO (LL)	19
2.3.4 LÍMITE PLÁSTICO (LP)	20
2.3.5 ÍNDICE PLÁSTICO (IP)	20
2.3.6 GRAVEDAD ESPECÍFICA	21
2.3.7 DENSIDAD SECA MÁXIMA – HUMEDAD ÓPTIMA	21
2.3.8 DENSIDAD DE CAMPO	23

2.4	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	25
2.4.1	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO	25
2.4.2	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS	32
2.5	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS.....	37
2.5.1	RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)	37
2.6	ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS.....	38
2.6.1	ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS CON ENZIMAS ORGÁNICAS.....	39
2.6.1.1	ESTABILIZACIÓN EN CAMINOS VECINALES	41
2.6.1.2	CONSTRUCCIÓN DE UN CAMINO O VÍA.....	41
2.6.1.3	CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS PROVISORIOS	43
2.6.1.4	EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS	45
2.6.1.5	CONDICIONES PARA EL RECIBO DE LOS TRABAJOS	48
2.6.1.6	CALIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	50
2.6.1.8	CALIDAD DEL PRODUCTO TERMINADO.....	50
2.6.1.9	MEDIDA	52
2.6.2	ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS CON CEMENTO.....	52
2.6.2.1	MECANISMO DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO....	53
2.6.2.2	ETAPAS DE LA EJECUCIÓN	55
2.6.2.3	TIPOS DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO	56
2.6.2.4	EFFECTOS A MEDIO Y LARGO PLAZO	58
2.6.2.5	FACTORES QUE AFECTAN LA MEZCLA DE SUELO + CEMENTO	59
2.6.2.6	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS SUELO – CEMENTO	61
2.6.2.7	PROPIEDADES DE LA MEZCLA SUELO – CEMENTO.....	61
2.6.2.8	FASES DE LA DOSIFICACIÓN	62
2.6.2.9	FABRICACIÓN Y CURADO DE LAS PROBETAS.....	66
2.6.2.10	SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO	66
2.6.2.11	FÓRMULA DE TRABAJO	67
2.6.3	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA..	68
2.6.3.1	DISEÑO DE UN ESTABILIZADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA	70
2.6.3.2	DOSIFICACIÓN DE SUELO – EMULSIÓN.....	71

2.6.3.3 PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LA ESTABILIZACIÓN	71
2.6.3.4 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS	71
2.6.3.5 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE	73
2.6.3.6 MÉTODO DE MEZCLA “in situ”	73
2.6.3.7 LIMITACIONES DE LA EJECUCIÓN	75
CAPITULO III.....	77
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	77
3.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE ESTUDIO	77
3.2 ENSAYOS DE CAMPO.....	78
3.2.1 ENSAYO CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN (DCP)	78
3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO	82
3.3.1 LÍMITES DE ATTERBERG.....	83
3.3.2 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA	91
3.3.3 PROCTOR MODIFICADO.....	95
3.3.4 RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)	100
3.3.5 RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA (CBR) DEL SUELO CON ENZIMAS	111
3.3.6 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE SUELO - CEMENTO	122
3.3.7 ELABORACIÓN DE BRIQUETAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA	130
CAPITULO IV	144
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	144
4.1 ENSAYOS DE LÍMITES DE ATTERBERG.....	144
4.2 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA.....	144
4.4 ENSAYO CBR	146
4.5 COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS CON ENZIMA Y SIN ENZIMA	147
4.6 ESTABILIZACIÓN CON OTROS AGENTES (CEMENTO Y EMULSIÓN).....	148
4.7 DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO	149
4.7.1 ALTERNATIVAS DE DISEÑO:.....	150

4.7.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO AASHTO DE PAVIMENTOS	150
4.7.3 TRÁFICO DIARIO INICIAL Y TRÁFICO FUTURO	156
4.7.4.1 METODOLOGÍA EMPLEADA.	159
4.7.4.1 MÓDULO DE RESILIENCIA.	162
4.7.4.2 CÁLCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL (SN).....	163
4.7.4.3 DETERMINACIÓN DE ESPESORES.	166
4.7.5 DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO BAJO CONDICIONES NATURALES DE SUB-RASANTE:	168
4.7.6 DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO CON SUELO ESTABILIZADA CON ENZIMA (SUB-RASANTE MEJORADA).....	170
4.7.7 DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO CON BASE DE SUELO EMULSIÓN.....	174
4.7.8 DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO CON BASE DE SUELO CEMENTO.	178
4.7.8.1 MÉTODO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)	178
4.7.8.2 METODO AASHTO.....	180
4.8.5 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO BAJO CONDICIONES NATURALES DE SUB-RASANTE	192
4.8.6 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO INCLUIDO ESTABILIZACIÓN DE LA SUB-RASANTE CON ENZIMAS ORGÁNICAS.....	192
4.8.7 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO INCLUIDO ESTABILIZACIÓN DE LA SUB-RASANTE CON CEMENTO	193
4.8.8 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO INCLUIDO ESTABILIZACIÓN DE LA SUB-RASANTE CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	193
CAPITULO V	195
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	195
5.1 BIBLIOGRAFÍA.....	197

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1. Sistema para identificar el tamaño de partículas del suelo	10
Tabla N° 2. Sistema de clasificación AASHTO	31
Tabla N° 3. Prefijos y sufijos del suelo	33
Tabla N° 4. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo...	33
Tabla N° 5. Porcentajes iniciales de cemento	64
Tabla N° 6. Humedades del ensayo de LL.....	88
Tabla N° 7. Resultados de LP	91
Tabla N° 8. Resultado del ensayo de granulometría.	94
Tabla N° 9. Resultado del ensayo Proctor modificado.	98
Tabla N° 10. Ensayo CBR.	102
Tabla N° 11. Valores de tiempo y penetración para el ensayo CBR.....	106
Tabla N° 12. Densidades CBR.	106
Tabla N° 13. Humedades CBR.	106
Tabla N° 14. Esponjamiento y penetración ensayo CBR.	109
Tabla N° 15. Densidad y humedad el ensayo CBR con enzimas sin curar.....	114
Tabla N° 16. Esponjamiento y penetración CBR con enzima sin curar. ...	115
Tabla N° 17. Densidades y humedades CBR con enzima curada.	117
Tabla N° 18. Esponjamiento y penetración CBR con enzima curada.	118
Tabla N° 19. Dimensiones del cilindro Proctor.....	128
Tabla N° 20. Resultado ensayo a compresión probetas de suelo-cemento.	127
Tabla N° 21. Resultados del ensayo Marshall.	141
Tabla N° 22. Rango de resistencias a compresión sin confinamiento a los 7 y 28 días.	148
Tabla N° 23. Coeficientes de drenaje. AASHTO 93.....	153

Tabla N° 24. Valores del nivel de Confianza (R) de acuerdo al tipo de camino. AASHTO 93.....	154
Tabla N° 25. Valores de Zr en función de la confiabilidad R. AASHTO, 1993.	155
Tabla N° 26. Resumen de proyecciones de tráfico para 10 años	158
Tabla N° 27. Distribución promedio de vehículos pesados.	159
Tabla N° 28. Factor de carga equivalente.	161
Tabla N° 29. Número de ejes equivalentes.....	162
Tabla N° 30. Coeficientes de capas para diseño estructural de pavimentos flexibles. AASHTO, 1993	167
Tabla N° 31. Espesores mínimos para diseño de pavimentos flexibles....	168
Tabla N° 32. Espesores de carpeta asfáltica para base de cemento.....	179
Tabla N° 33. Porcentaje de indirectos.....	183
Tabla N° 34. Presupuestos de construcción	194

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N° 1. Sitio de extracción de las muestras. Autor.....	77
Fotografía N° 2. Calicata. Autor	77
Fotografía N° 3. Extracción del suelo. Autor	78
Fotografía N° 4. Equipo de Casagrande. Autor.....	85
Fotografía N° 5. Hidratación de la muestra. Autor	86
Fotografía N° 6. Porción de suelo en la cápsula de Casagrande. Autor	86
Fotografía N° 7. Surco de la muestra en la cápsula de Casagrande. Autor .	87
Fotografía N° 8. Determinación del Límite Plástico. Autor	90
Fotografía N° 9. Bastones de suelo para determinación del LP. Autor	90
Fotografía N° 10. serie de tamizes. Autor	92
Fotografía N° 11. Lavado del material en el tamiz N° 200. Autor	93
Fotografía N° 12. Suelo lavado. Autor	93
Fotografía N° 13. Equipo de compactación. Autor	95

Fotografía N° 14. Pesado del suelo. Autor.....	97
Fotografía N° 15. Homogenización del suelo humectado. Autor.....	98
Fotografía N° 17. Enrasado del suelo compactado. Autor	99
Fotografía N° 18. Equipo CBR. Autor	102
Fotografía N° 19. Extracción del disco espaciador. Autor	103
Fotografía N° 20. Papel filtro en la base perforada. Autor.....	104
Fotografía N° 21. Pesas sobre la muestra compactada. autor.....	104
Fotografía N° 23. Ensayo del penetración CBR. Autor	105
Fotografía N° 24. Humectación del suelo con enzimas orgánicas. Autor ..	111
Fotografía N° 25. Enzima Orgánica en estado natural. Autor	112
Fotografía N° 26. Curado al horno de las muestras. Autor	113
Fotografía N° 27. Muestras sumergidas en agua. Autor	114
Fotografía N° 28. Pesado de la muestra sacada del agua. Autor	114
Fotografía N° 29. Muestra ensayada CBR. Autor	115
Fotografía N° 30. Incorporación del cemento. Autor	124
Fotografía N° 31. Extracción de la muestra suelo-cemento. Autor	126
Fotografía N° 32. Ensayo a compresión de la probeta suelo-cemento. Autor	127
Fotografía N° 33. Equipo para la compactación de briquetas por el método Marshall. Autor.....	132
Fotografía N° 34. Equipo utilizado para la extracción de briquetas. Autor .	132
Fotografía N° 35. Mezcla del suelo con emulsión asfáltica. Autor	133
Fotografía N° 36. Colocación del suelo en el molde a compactar. Autor ...	134
Fotografía N° 37. Elaboración de briqueta. Autor	134
Fotografía N° 38. Muestra compactada dentro del molde. Autor	135
Fotografía N° 39. Curado de briquetas en el horno. Autor	135
Fotografía N° 42. Pesado de briquetas al aire. Autor.....	136
Fotografía N° 43. Pesado de briquetas en agua. Autor	137
Fotografía N° 44. Mordaza de rotura. Autor	138
Fotografía N° 45. Briquetas en baño maría. Autor	139

Fotografía N° 46. Lecturas iniciales en cero. Autor	140
Fotografía N° 47. Ensayo Marshall. Autor	140

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1. Fases del suelo.	8
Gráfico N° 2. Estructura que dan cohesión a los suelos granulares (a) Partículas con textura angular. (b) Partículas con textura redondeada.	15
Gráfico N° 3. Estructura de las partículas de arcilla sedimentadas.....	16
Gráfico N° 4. Estructuras microscópicas que dan cohesión al suelo (a) Macroestructura. (b) Microestructura.	16
Gráfico N° 5. Límites de Atterberg	20
Gráfico N° 6. Densímetro nuclear – transmisión directa	24
Gráfico N° 7. Densímetro nuclear – retrodispersión.....	24
Gráfico N° 8. Carta de plasticidad. AASHTO	28
Gráfico N° 9. Carta de Plasticidad Casagrande	36
Gráfico N° 10. Caracterización de los suelos.....	37
Gráfico N° 11. Diagrama esquemático de una emulsión. Instituto Mexicano del Transporte.....	69
Gráfico N° 12. Molde metálico para compactar briquetas.....	72
Gráfico N° 13. Esquema del cono dinámico de penetración. ASTM 6951-03	79
Gráfico N° 14. Curva DCP para una serie de valores, se observan tres capas diferentes	80
Gráfico N° 15. Método de cálculo del Límite Líquido	88
Gráfico N° 16. Resultado del Límite Líquido.	89
Gráfico N° 17. Curva granulométrica.	94
Gráfico N° 18. Curva densidad seca vs % de humedad.	98
Gráfico N° 19. Curvas que relacionan la hincas del pistón con las presiones aplicadas.....	107
Gráfico N° 20. CBR del suelo natural.....	110
Gráfico N° 21. CBR de diseño del suelo natural.	110

Gráfico N° 22. CBR del suelo con enzima sin curar.....	118
Gráfico N° 23. CBR del suelo con enzima sin curar.....	118
Gráfico N° 24. CBR del suelo con enzima con curado.	121
Gráfico N° 25. CBR de diseño del suelo con enzima con curado.	121
Gráfico N° 26. Curva Resistencia vs % de cemento.	127
Gráfico N° 27. Curva densidad Bulk vs % de emulsión asfáltica.	142
Gráfico N° 28. Curva Estabilidad vs % de emulsión asfáltica.	142
Gráfico N° 29. Método gráfico para el índice de grupo.	145
Gráfico N° 38. Promedio de Factores de Carga Equivalente.	160
Gráfico N° 40. Abaco para el cálculo del número estructural.....	165
Gráfico N° 30. Cálculo del número estructural para un Módulo resiliente de 12691 psi. Cálculo de las ecuaciones Aashto 1993.	166
Gráfico N° 31. Espesor de pavimento con base granular.	169
Gráfico N° 39. Correlación entre CBR de Diseño y Coeficiente Estructural Equivalente para Sub-rasante Mejorada.....	170
Gráfico N° 32. Cálculo de número estructural para un Módulo resiliente de 17441psi.	172
Gráfico N° 33. Espesor de pavimento estabilizado con enzima.....	174
Gráfico N° 34. Espesor de pavimento con suelo estabilizado con emulsión.	176
Gráfico N° 35. Variación de coeficientes estructurales para mezclas de bases	177
Gráfico N° 41. Abaco para diseño de espesor en suelo cemento fino.	179
Gráfico N° 36. Espesor de pavimento estabilizado con cemento, método de la PCA.....	180
Gráfico N° 37. Espesor de pavimento estabilizado con cemento, método AASHTO.....	182

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación N° 1. Cálculo del contenido de humedad.	18
Ecuación N° 2. Cálculo del Índice Plástico.....	20
Ecuación N° 3. Cálculo del Índice de Grupo	29

Ecuación N° 4. Energía de compactación.....	96
Ecuación N° 5. Cálculo de CBR.....	107
Ecuación N° 6. Confiabilidad por etapa.....	155
Ecuación N° 7. Cálculo del tráfico futuro.....	156
Ecuación N° 8. Número de ejes equivalentes.....	161

RESUMEN

INVESTIGACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ENZIMA APLICADO A LA SUB-RASANTE DE LA AVENIDA QUITUMBE- ÑAN, CANTÓN QUITO.

La presente investigación demostró las ventajas que se obtienen al estabilizar un suelo cuyas propiedades físicas y mecánicas son deficientes. Estos suelos son típicos y se los encuentra con mucha frecuencia en distintas partes del país, creando muchas expectativas dentro de la ingeniería ya que son la base primordial en el uso para sub-rasantes de una estructura de pavimentos.

Por lo expuesto, se analizaron las propiedades físicas y mecánicas de un grupo de suelo y luego se conformo una mezcla con los diferentes agentes estabilizantes normados y disponibles en la zona o área de influencia.

Realizando los ensayos de laboratorio determinamos los datos de partida para posteriormente comparar con los resultados obtenidos de la mezcla estabilizada.

La determinación de las proporciones óptimas de los estabilizantes fue el producto de varios ensayos, cuyos análisis y resultados permitieron obtener las cantidades correctas para cada caso.

DESCRIPTORES

SUB-RASANTE ESTABILIZADA / ENZIMAS ORGÁNICAS SUELO / SUELO CEMENTO / EMULSIÓN ASFÁLTICA / ENSAYOS / LIMITE LIQUIDO / LÍMITE PLÁSTICO / ÍNDICE DE PLASTICIDAD / GRANULOMETRÍA / PROCTOR MODIFICADO / RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR) / PORCENTAJES ÓPTIMOS

ABSTRACT

RESEARCH ON THE STABILITY OF SOILS WITH ENZYMES APPLIED TO THE SUBGRADE ON QUITUMBE-ÑAN AVENUE, QUITO

The following thesis seeks to demonstrate the advantages of stabilizing a soil with deficient characteristics like the ones found in different parts of the country, for its use in subgrades for roadway structures.

Consequently, physical and mechanical properties of soils were determined and later a mixture of soil and stabilizers was prepared in order to match the requirements exposed in the technical standards.

With different rehearsals in labs, the starting data was determined in order to continue with the comparison of the results that were obtained with the stabilized mixture.

In order to determine the quantity of the different stabilizers needed it was necessary to try out the soil by mixing different quantities of each one of them and establish the optimal proportion for the mixture.

DESCRIPTORS

ESTABLISHED SUBGRADE / ORGANIC ENZYMES SOIL / CONCRETE SOIL / ASPHALT EMULSION / REHEARSALS / LIQUID LIMIT / PLASTIC LIMIT / PLASTICITY INDEX / GRANULOMETRY / MODIFIED PROCTOR / CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) / OPTIMAL PERCENTAGE

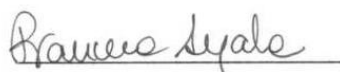
CERTIFICACIÓN

Yo, Francesca Elisabetta Ayala Grilli, avalo el abstract de la tesis del Sr. David Gabriel Cedeño Plaza con el tema **“INVESTIGACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON ENZIMAS APLICADO A LA SUB-RASANTE DE LA AVENIDA QUITUMBE – ÑAN, CANTÓN QUITO”**.

Adjunto diploma que constata mi conocimiento del idioma inglés.

El interesado puede hacer uso de este certificado como bien convenga.

Atentamente,

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'Francesca Ayala', is written over a horizontal line.

Lic. Francesca Ayala
C.I. 1708504228

FORMA DE REGIMEN ESCOLAR Y REAFIRMACION DE TITULO UNIVERSITARIO
artificial que el Titulo Universitario
se encuentra refrendado con el
no. P.O.O. en la Págs.
Julio, 2.9. En P.O.O. 1.

Shelbuden de Fournier
JEFE DE REGIMEN ESCOLAR Y REAFIRMACION DE TITULO UNIVERSITARIO

La República del Ecuador
p en su nombre
p por autoridad de la Ley

La Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Confiere el Título de
Licenciada Multilingüe en Negocios e
Intercambios Internacionales

A **Francesca Elisabetta Ayala Brilli**

Por haber cumplido con los correspondientes requisitos legales y reglamentarios.

Quito, 6 de Febrero de 1998

+ *A. Gonzalez*
Arzobispo de Guayaquil
Gran Canciller

Luis Alberto
Rector

[Signature]
Secretario General



CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Las condiciones que ofrece la movilización de bienes y personas sobre las vías, constituyen uno de los principales aspectos relacionados con la productividad de una ciudad, de una región y de la misma nación. Así mismo, el estado de las vías es un parámetro importante relacionado con la calidad de vida de los ciudadanos. Las carreteras vecinales en nuestro país, cumplen un papel importante dentro de la red vial nacional debido a que representan un alto porcentaje, y en su gran mayoría se encuentran urgidas de mantenimiento.

Las vías inter-provinciales conectadas son alternativas de origen – destino, dando un mayor cubrimiento económico y social. Nuestras vías son un patrimonio muy grande que hay que mantener y rehabilitar mediante procedimientos técnicos acordes a su realidad de prestación de servicio. Para ello es necesario utilizar tecnologías económicas comprobadas que brinden igual o mejor calidad en cuanto a su durabilidad y eficiencia.

La ausencia de materiales adecuados para construcción de pavimentos ha motivado la investigación de técnicas que consigan la estabilización o mejoramiento de materiales, mediante la manipulación o el tratamiento de materiales específicos.

El objetivo que se busca es tener mejores cualidades de estos materiales que nos garanticen resistencias suficientes para no sufrir deformaciones o desgastes inadmisibles por efectos de tránsito o agentes atmosféricos.

Existen muchas formas de estabilización de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos, de forma general tenemos las siguientes:

- La estabilización física, como por ejemplo: la mezcla de suelos y refuerzos sintéticos

- La estabilización química, se consigue con la adición de sustancias o compuestos principales como cal, cemento Portland, enzimas, emulsiones asfálticas y polímeros
- La estabilización mecánica, es obtenida por la compactación

El uso de enzimas orgánicas representa un método de estabilización para suelos finos.

1.2 INTRODUCCIÓN

Cuando un suelo presenta resistencia suficiente para no sufrir deformaciones ni desgastes inadmisibles por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable.

El suelo natural en ciertas condiciones cuenta con la composición granulométrica y la plasticidad así como el grado de humedad necesario para que, una vez compactado, presente las propiedades mecánicas que lo hacen idóneo como firme para un camino.

Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar los suelos en la construcción eran empíricos y, como las actividades artesanales, se transmitían de generación en generación. Los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan principalmente en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación.

En general puede decirse que todos los suelos pueden ser estabilizados, pero si la estabilización ha de lograrse por aportaciones de otros suelos o por medios de otros elementos (por ejemplo cemento, enzimas orgánicas, emulsión asfáltica) el costo de la operación puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir no posee determinadas condiciones.

Entre las aplicaciones de un suelo modificado o estabilizado se encuentran la mejora de los suelos granulares, susceptibles a heladas y el tratamiento de los suelos limosos y/o arcillosos para reducir los cambios de volumen.

El desarrollo de los países, se basa primordialmente en sus vías de comunicación, a través de ellos se lleva a cabo las interrelaciones económicas, sociales, culturales, etc. Miles de millones de dólares y horas - hombre se gasta cada año en la construcción, mantenimiento y reparación de caminos. Se suma a esto acanalamientos, erosión, deslizamiento de tierras, baches y polvo problemas comunes de los caminos secundarios, o no pavimentados, que afectan a todos. Tiempo y dinero son irremediablemente perdidos, los costos aumentan y nuestra comodidad y seguridad son puestas en juego por las condiciones precarias de los caminos.

Actualmente en el Distrito Metropolitano de Quito, se está llevando un agresivo programa orientado hacia el mejoramiento y desarrollo vial, a través de la construcción y rehabilitación de carreteras. Programa en el cual se incluye el uso de estabilizadores como insumo indispensable para otorgarle mayor vida útil a este tipo de estructuras y, consecuentemente, garantizar la vida útil y ampliar los periodos de mantenimiento. Las enzimas orgánicas, es una alternativa para la estabilización de carreteras cuya formulación líquida enzimática natural, no tóxica y biodegradable mejora la calidad de las obras de ingeniería. La enzima cataliza la degradación de los materiales orgánicos en el suelo alterando favorablemente sus atributos físicos y químicos. Esto da como resultado una mejor unión química de partículas cohesivas de suelo y una estructura de suelos más estable y duradera.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Mejorar las propiedades físico – mecánicas del suelo en carreteras, con suelos de fundación de matriz limosa o arcillosa, mediante la aplicación de estabilizante de suelo a base de enzimas orgánicas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar ensayos en laboratorio que determinen las propiedades mecánicas de los suelos, mismos que conformarán la sub-rasante de una estructura a estabilizar.
2. Estudiar y evaluar el comportamiento de las enzimas con suelos de alto índice de plasticidad
3. Estudiar y evaluar el aumento de la densidad seca máxima del suelo (sub-rasante) estabilizado en carretera.
4. Estudiar y evaluar el aumento de la capacidad de soporte (CBR) del suelo (sub-rasante) estabilizado en carreteras.
5. Comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con las tolerancias propuestas para la aceptación de suelos finos estabilizados con enzimas orgánicas.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El crecimiento urbano y el incremento del parque vehicular de la ciudad de Quito traen como consecuencia un incremento en la necesidad de construcción de vías nuevas y un mejoramiento de las actuales.

Al estar ubicada la ciudad de Quito en la sierra ecuatoriana el tipo de suelo predominante sobre todo al sur de la ciudad (Turubamba, Quitumbe), no cumplen con las características necesarias para formar parte de la estructura del pavimento por sus propiedades físicas y mecánicas insuficiente.

Como una alternativa para el uso de estos materiales, tenemos su mejoramiento mediante la estabilización con enzimas orgánicas, lo que significa reducir el costo de la estructura del pavimento.

La sub-rasante puede ser mejorada hasta que alcance el comportamiento técnico firme y de mejor calidad.

Lo expuesto se justifica por que las pruebas e investigaciones que se realizarán sobre la mezcla del estabilizante con el suelo, nos permitirá proponer una alternativa para el mejoramiento de las propiedades físico – mecánicas del mismo.

1.5 ALCANCE

Esta actividad tiene como finalidad el modificar positivamente las propiedades físicas del material y mejorar su comportamiento mecánico o hidráulico.

Determinar los beneficios en función de los costos de cada uno de los procesos de estabilización.

.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIÓN DE SUELO

Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas y especialmente las propiedades mecánicas. Desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos se diferencia del término roca al considerarse específicamente bajo este término un sustrato formado por elementos que pueden ser separados sin un aporte significativamente alto de energía.

Se considera suelo al sistema multifase formado por:

- Fase sólida, que constituyen el esqueleto de la estructura del suelo
- Fase líquida (generalmente agua)
- Fase gaseosa (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos.

Como se indica en el siguiente gráfico:

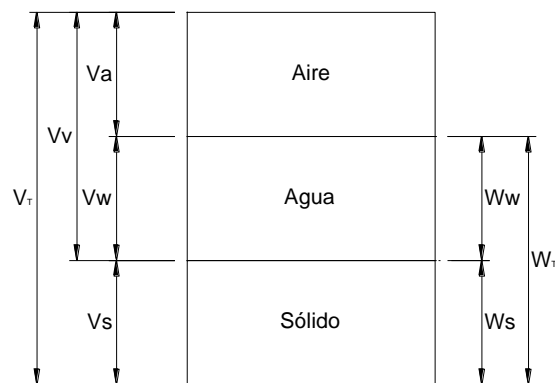


Gráfico N° 1. Fases del suelo. Autor

Pueden distinguirse tres grupos de parámetros que permiten definir el comportamiento del suelo ante la obra que en él incide:

- los parámetros de identificación
- los parámetros de estado
- los parámetros estrictamente geomecánicos.

Entre los parámetros de identificación son los más significativos la granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua). El tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocidos como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo. Las variaciones en la consistencia del suelo en función del contenido en agua diferencian también las mencionadas clases granulométricas principales.

Los parámetros de estado fundamentales son la humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes.

En función de la variación de los parámetros de identificación y de los parámetros de estado varía el comportamiento geomecánico del suelo, definiéndose un segundo orden de parámetros tales como la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o la permeabilidad.

La composición química y/o mineralógica de la fase sólida también influye en el comportamiento del suelo, si bien dicha influencia se manifiesta esencialmente en suelos de grano muy fino (arcillas). De la composición depende la capacidad de retención del agua y la estabilidad del volumen, presentando los mayores problemas los minerales arcillosos. Éstos son filosilicatos hidrófilos capaces de retener grandes cantidades de agua por adsorción, lo que provoca su expansión, desestabilizando las obras si no se realiza una cimentación apropiada. También son problemáticos los sustratos colapsables y los suelos solubles.

De manera genérica, es usual hablar de movimiento de suelos incluyendo en el concepto el trabajo con materiales, como rocas y otros, que sobrepasan la definición formal.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

2.2.1 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO

De acuerdo al tamaño predominante de partículas que contenga el suelo, los suelos generalmente son llamados: grava, arena, limo, arcilla o una mezcla de ellos, según como se demuestra en la Tabla N° 1.

NOMBRE DE LA ORGANIZACIÓN	TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN mm			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.003
American Association of Highway and Transportation (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.004
Unifield Soil Classification System (US)	75 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (limos y arcillas) < 0.075	

Tabla N° 1. Sistema para identificar el tamaño de partículas del suelo. Das, 1998

Diversas organizaciones que estudian aspectos relacionados con el suelo han elaborado sistemas de clasificación para identificar el tamaño de las partículas de un suelo para sus propósitos específicos. En la Tabla N° 1 se muestra algunos de los sistemas más conocidos empleados por estas organizaciones para identificar las partículas del suelo.

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ha sido adoptado como el estándar por la American Society for Testing and Materials (ASTM) y el reglamento que esta sociedad ha desarrollado para el análisis y estudio del suelo es aceptado a nivel internacional.

Grava

Según la norma ASTM D2487-00 el tamaño de estas partículas varía de 75 a 4.75 mm, estas a su vez están divididas en dos categorías: grava gruesa que está comprendida entre 75 y 19 mm y grava fina que está comprendida entre 19 y 4.75 mm.

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca de textura redondeada, debido al desgaste que sufren las partículas al ser transportadas por las corrientes de los ríos. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, márgenes, en los conos de deyección de los ríos y en depósitos con grandes cantidades.

Arena

Se llama arena a las partículas granulares de textura variada procedentes de la desintegración de las rocas o de su trituración artificial y cuyo tamaño según la norma ASTM D2487-00 varía entre 4.75 a 0.075 mm, la arena está clasificada en tres categorías: arena gruesa que tiene un tamaño de 4.75 a 2 mm, la arena mediana de un tamaño comprendido entre 2 y 0.425 mm y la arena fina comprendida entre 0.425 y 0.075 mm.

El origen y la existencia de la arena es análoga a la de la grava, comúnmente las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Principalmente está compuesta de cuarzo y otros minerales que dan resistencia mecánica a las partículas.

Limo

El limo es una partícula mineral pequeña de textura granular o escamosa, que suele encontrarse en las canteras y en los ríos. El tamaño de las partículas de limo según la norma ASTM D2487-00 es menor a 0.075 mm. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. El suelo compuesto por limo es relativamente impermeable, fácilmente erosionable.

Arcilla

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas de textura escamosa, compuestas de minerales de arcilla con un tamaño diminuto mucho menor a 0.075 mm. La arcilla químicamente es un silicato hidratado de: aluminio,

hierro o magnesio. Las microestructuras que forman las partículas diminutas que componen la arcilla ocasionan que esta sea poco permeable y el contenido de humedad comunica a la masa de suelo la propiedad plástica.

Guijarro y canto rodado

Existen partículas de mayor tamaño que la grava, según la norma ASTM D2487-00 a las partículas con tamaño comprendido entre 75 a 350 mm se las llama guijarro o bolón y a las que superan los 350 mm se las denomina canto rodado. Por lo general estos dos tipos de partículas son fragmentos de roca, constituyen ser componentes aislados del suelo y suelen aparecer sobre o por debajo de la superficie terrestre.

Materia coloidal

Existen también partículas muy pequeñas que no pueden llegar a ser vistas fácilmente. Las partículas con tamaño menor a 2 μm , constituyen la fracción más fina de los suelos. Que pueden ser distinguidas con la ayuda de un microscopio potente y su estructura molecular puede ser analizada por medio de los rayos X, a este tipo de partículas se las conoce como coloide o ultra-arcilla. Estas partículas debido a su tamaño no suelen considerarse dentro los sistemas de clasificación, pero forman parte de la fracción fina del suelo.

2.2.2 FORMACIÓN

La formación de los suelos es un proceso continuo en el tiempo y que se ve influido por cinco factores, estos son:

- Clima
- Material parental o de origen
- Relieve
- Organismos

- Tiempo cronológico

Estos factores no forman el suelo pero si controlan a los procesos que intervienen en la formación. Los factores son considerados como variables independientes que interactúan para generar un tipo de suelo específico, con características y propiedades únicas y distintivas.

Clima

Este factor es sin duda uno de los más importantes en la formación del suelo ya que además de influenciar directamente a los procesos que intervienen en la formación de este recurso, afecta directa o indirectamente a los otros factores de formación, como por ejemplo a los organismos. Este factor de formación considera los efectos que principalmente tienen la precipitación y la temperatura (a nivel de regiones climáticas) en el desarrollo del suelo. Es fácil de inferir que los suelos desarrollados en zonas tropicales, en que las temperaturas medias son elevadas y las precipitaciones son cuantiosas, los suelos tendrán un desarrollo y características muy diferentes a la de suelos desarrollados en regiones áridas, mediterráneas o templado húmedas. A mayor precipitación, la vegetación presenta un mayor desarrollo y por lo tanto, existen mayores aportes de material orgánico al suelo. Así mismo, mayores montos de precipitación se ven asociados en cambios de pH en el suelo debido al efecto de lixiviación de las bases de cambio que provoca el agua en el suelo. Con mayor temperatura y precipitación, los suelos se tornan más rojizos debido al incremento en la formación de arcillas y al incremento en las formas deshidratadas de óxidos de hierro. A un nivel más local, las diferencias en altura también provocan variaciones en el clima.

Aumentos en altitud van asociados a incrementos en las precipitaciones y a disminuciones en las temperaturas, lo cual se refleja necesariamente en el desarrollo de los suelos.

Material parental

Este factor se refiere a los diferentes materiales rocosos y minerales que darán origen al suelo. Diferentes materiales parentales crean diferentes suelos, con diferentes propiedades. En general las rocas que originan el suelo se clasifican en rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas.

Cada uno de estos tres tipos generales de roca presenta una inmensa variedad de subtipos de rocas, cada una de las cuales, presenta sus propias características físicas (ejemplo, dureza), químicas y mineralógicas. Por lo tanto, la formación de los suelos estará en directa relación al o los tipos de roca que conformaron el sustrato original desde el cual un determinado suelo se desarrolló.

Topografía

La topografía, afecta el balance hídrico y la infiltración de agua, el microclima (radiación solar y temperatura), los procesos de erosión y depositación, la vegetación actual y los procesos básicos de formación de suelo. Un claro ejemplo del efecto de la topografía lo podemos ver en los cerros y montañas de la Cordillera. Los suelos desarrollados en exposición sur presentan mayor desarrollo y profundidad que los suelos desarrollados en la exposición norte. Las laderas de exposición sur reciben menor radiación y tienen, por lo tanto, mayor almacenamiento de agua y desarrollo de vegetación.

Organismos

Las plantas son las primeras en ocupar un determinado sitio produciendo cambios en el sustrato o suelo en el cual se desarrollan. Las propiedades del suelo pueden variar en función de la distancia a una planta en particular o bien entre diferentes tipos de vegetación. Además del efecto de las plantas, la fauna del suelo afecta el desarrollo del mismo.

Tiempo

La mayoría de los procesos de formación de suelos son dependientes del tiempo. Por lo tanto, muchas propiedades del suelo se desarrollan en función del tiempo. Por ejemplo, la generación de agregados y de estructura es sólo posible de observar en un suelo bien desarrollado. Suelos incipientes tienden a no presentar estructura. De similar manera, la acumulación de arcillas en el perfil de suelo es función del tiempo. En las primeras etapas de formación de un suelo, dicha acumulación es inexistente o muy marginal.

2.2.3 ESTRUCTURA

Viene a ser la disposición, arreglo geométrico u ordenación que adoptan las partículas minerales para dar lugar al conjunto llamado suelo. Existen varios factores que influyen en la estructura de suelo como ser: la textura, tamaño, composición mineralógica de las partículas y el contenido de agua del suelo.

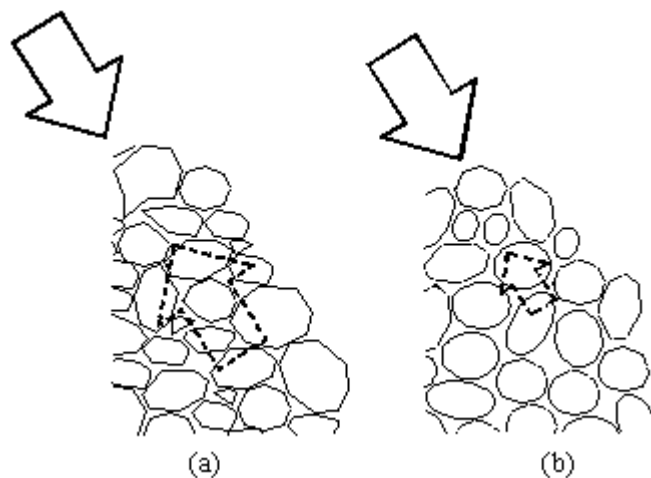


Gráfico N° 2. Estructura que dan cohesión a los suelos granulares (a) Partículas con textura angular. (b) Partículas con textura redondeada.

Para el caso de suelos compuestos de partículas con forma granular, la trabazón entre partículas origina estructuras granulares simples y la fricción que se origina entre ellas contrarresta el deslizamiento de unas respecto a

otras, como se muestra en el Gráfico N° 2. A este comportamiento se lo identifica como la cohesión para el caso de suelos granulares, donde el suelo presenta resistencia contra su disgregación ocasionada por un agente externo.

El grado de cohesión que presentan los suelos granulares, está en función a la textura de las partículas de forma granular. La partículas con textura angular (Gráfico N° 2a) logran que el suelo tenga cohesión, mientras que las partículas con textura redondeada (Gráfico N° 2b) no contribuyen a la cohesión del suelo.

La forma de hojuela, el tamaño y la carga eléctrica negativa superficial de las partículas compuestas de minerales de arcilla, da lugar a que estas partículas generen fuerzas de atracción y repulsión entre ellas, originando estructuras que se muestran en el Gráfico N°3.

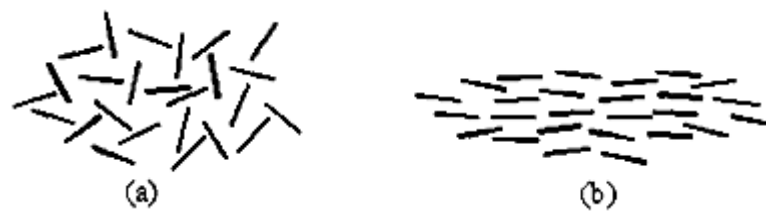


Gráfico N° 3. Estructura de las partículas de arcilla sedimentadas.

En un depósito de sedimento compuesto de partículas floculadas de minerales de arcilla, se observa en el Gráfico N° 4, que se forman diferentes unidades estructurales microscópicas.

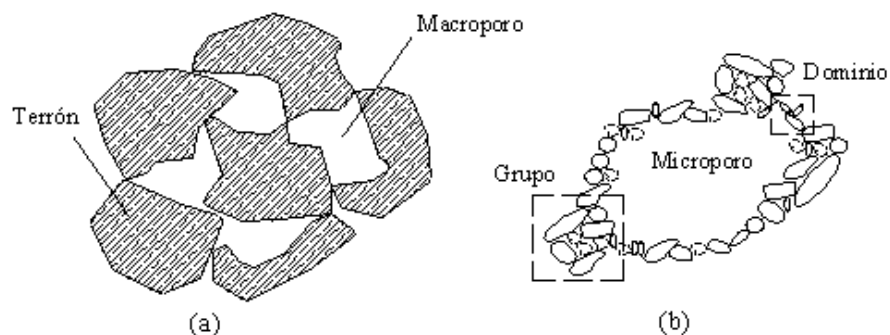


Gráfico N° 4. Estructuras microscópicas que dan cohesión al suelo (a) Macroestructura. (b) Microestructura. Das, 1998.

En el Gráfico N° 4b se ve que la unión de una cantidad pequeña de partículas de minerales de arcilla es llamada: dominios, un conjunto de dominios agrupado por las fuerzas interparticulares es llamado grupo, un grupo de dominios y racimos establecen una microestructura que encierran vacíos llamados microporos. Los racimos en grandes grupos forman un terrón (Gráfico N°4b) que son las unidades más grandes y pueden ser vistos sin un microscopio, estos agrupados en conjunto establecen una macroestructura que forma vacíos llamados macroporos. Por lo general la relación de vacíos con respecto a sólidos en un suelo compuesto de partículas arcillosas es mayor que en el caso de suelos con partículas granulares.

Las partículas de arcilla pueden tener una fuerza repulsiva si presentan cargas positivas en su superficie, por lo que sus bordes cargados se alejarán (Gráfico N° 4). Debido a la abundante presencia de carbonatos y algunos minerales como el sodio o cuando se agrega una solución salina, las partículas cuya capa de agua adsorbida es doble (gruesa) se repelerán con mayor magnitud. Este comportamiento de las partículas de minerales de arcilla no contribuye a que la masa de suelo tenga cohesión.

Cementación

Los sedimentos que son depositados en un lecho con el tiempo van endureciendo hasta que se forman rocas sedimentarias, este proceso comienza inmediatamente después que el sedimento es acumulado. El agua que circula por los espacios vacíos o poros entre las partículas del sedimento acarrea materia mineral que cubre los granos y actúa como un cemento que las une. A este proceso se lo conoce con el nombre de cementación y es considerada una forma de cohesión pues une a partículas de diferentes tamaños.

2.3 PROPIEDADES ÍNDICE

Desde hace ya mucho tiempo se han construido diversos tipos de estructuras, como ser: presas, carreteras, acueductos y otros proyectos de ingeniería. Aunque el análisis estructural de todos estos varía de acuerdo a cada caso todos tienen algo en común, que se fundan sobre el suelo o la roca.

Por varios años, los ingenieros de la antigüedad desconocieron la importancia del estudio del comportamiento del suelo antes del diseño y construcción de estas estructuras, como consecuencia las mismas experimentaron los efectos del comportamiento del suelo, como el caso de la inclinación de la torre de Pisa construida en 1173. Por lo general, en aquel tiempo para construir una obra civil importante los ingenieros solían copiar a otra que había dado resultados satisfactorios. A lo largo de los años, diversos investigadores modernos han estudiado el suelo logrando significativos avances en cuanto a: clasificarlo, identificar sus propiedades y conocer su comportamiento.

2.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen.

El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de del agua y el peso del suelo seco, esto se expresa en términos de porcentaje.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Ecuación N° 1. Cálculo del contenido de humedad.

Donde:

W = contenido de humedad expresado en %

W_w = peso de agua contenido en el suelo

W_s = peso del suelo seco

2.3.2 GRANULOMETRÍA

La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca.

El tamaño de los granos de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas no pueden ser observadas con un microscopio.

2.3.3 LÍMITE LÍQUIDO (LL)

Es el contenido de agua tal que para un material dado, fija la división entre el estado casi líquido y plástico de un suelo.

Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

El ensayo para determinar el Límite Líquido es uno de los más corrientes en los laboratorios de la mecánica del suelo. Durante decenios el Límite Líquido ha sido registrado en la casi totalidad de los informes geotécnicos como criterio de caracterización y de clasificación de suelos cohesivos o como dato de entrada para definir otras propiedades del suelo con base en correlación es propuestas en la literatura.

2.3.4 LÍMITE PLÁSTICO (LP)

Definido como el contenido de agua en el punto de transición de la muestra, de un estado líquido a un estado plástico, en donde el suelo adquiere una cierta resistencia al corte.

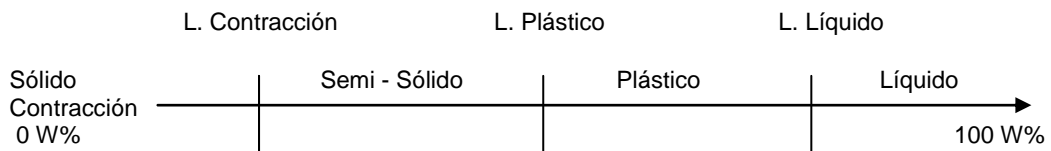


Gráfico N° 5. Límites de Atterberg

2.3.5 ÍNDICE PLÁSTICO (IP)

El Índice de plasticidad se define como la diferencia numérica entre el Limite Líquido y el Limite Plástico:

$$I_p = LL - LP$$

Ecuación N° 2. Cálculo del Índice Plástico

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = limite líquido

LP = limite plástico

Un Índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 5%, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los

cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 20%, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua.

El Índice de plasticidad define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial.

En suelos no plásticos, no es posible determinar el Índice de plasticidad.

2.3.6 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura.

2.3.7 DENSIDAD SECA MÁXIMA – HUMEDAD ÓPTIMA

La reducción de porosidad y el incremento de la humedad, conducen a un estado límite en el que se forma una red continua de agua. Más allá de cierto contenido de humedad, el agua comienza a tener una continuidad que cierra los poros comunicados. Como consecuencia el aire queda encerrado en forma de burbujas aisladas. Éstas son retenidas en cada poro y no es posible lograr una mayor densificación en el suelo para un mismo trabajo mecánico.

A partir de este estado, surge un neto cambio de propiedades por la existencia de un componente perfectamente elástico (aire ocluido). Su presencia implica que la permeabilidad al aire tienda a valores mínimos, dado que las burbujas solo pueden drenar junto con el agua o bien deslizándose dentro del conjunto.

2.3.2.1 Energía de Compactación (56000 lb/pulg²) – PROCTOR MODIFICADO

En mecánica de suelos, el ensayo de compactación Proctor es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. A través de él es posible determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, condición que optimiza el inicio de la obra con relación al costo y el desarrollo estructural e hidráulico.

Existen dos tipos de ensayo Proctor normalizados; el "Ensayo Proctor Normal", y el "Ensayo Proctor Modificado". La diferencia entre ambos estriba en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en el Proctor modificado.

Ambos ensayos se deben al ingeniero que les da nombre, Ralph R. Proctor (1933), y determinan la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos o áridos, en unas determinadas condiciones de humedad, con la condición de que no tengan excesivo porcentaje de finos, pues la prueba.

El ensayo Proctor modificado, al igual que el Proctor normal, es un ensayo de compactación de suelos. El Corps of Engineers de la U.S. Army, propuso un ensayo Proctor modificado en el que se aplica mayor energía de compactación por unidad de volumen, obteniéndose unas densidades secas máximas más elevadas y unas humedades óptimas menores que en el ensayo normal.

Para obtener la curva humedad-densidad seca, es necesario realizar el ensayo sobre varias muestras del suelo, que nos darán los puntos de dicha curva. Generalmente con cuatro o cinco de estos puntos ya es posible dibujarla, y por tanto, obtener la densidad máxima Proctor y la humedad óptima correspondiente.

2.3.8 DENSIDAD DE CAMPO

Es necesario utilizar un método para determinar la densidad que el suelo alcanza luego de la compactación en el campo.

Para obtener estas densidades existen los siguientes métodos en terreno:

- Cono de arena
- Balón de densidad
- Densímetro nuclear

El método del cono de arena, se aplica en general a partir de la superficie del material compactado, este método se centra en la determinación del volumen de una pequeña excavación de forma cilíndrica de donde se ha retirado todo el suelo compactado (sin pérdidas de material) ya que el peso del material retirado dividido por el volumen del hueco cilíndrico nos permite determinar la densidad húmeda. Determinaciones de la humedad de esa muestra nos permiten obtener la densidad seca.

El procedimiento con el balón de densidad es similar al del método del Cono de arena, el volumen del hueco se determina introduciendo a éste un globo de hule con agua de un recipiente calibrado, del cual el volumen se lee directamente.

Funcionamiento del Densímetro Nuclear

El Densímetro tiene dos modos de operación: el modo de Transmisión Directa (la varilla con la fuente perforando el material) y el modo de Retrodispersión (la varilla se encuentra próxima a la fuente, pero no perforando el material).

En el modo de Transmisión Directa, la varilla con la fuente de Cesio-137 se introduce en el terreno hasta la profundidad deseada. Los detectores en la base de la sonda cuantifican la radiación emitida por la varilla con la fuente. Para llegar a los detectores, los fotones gamma deben primero pasar a través del material, donde chocan con los electrones ahí presentes. Una alta

densidad del material supone un alto número de choques correspondientes, lo que reduce el número de fotones que llegan a los detectores. Como se indica en el siguiente gráfico:

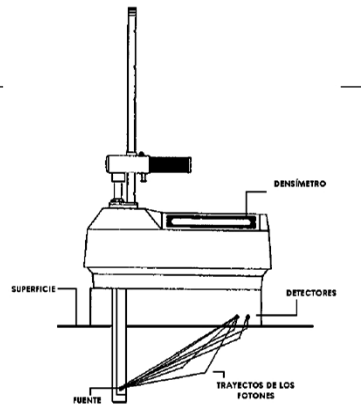


Gráfico Nº 6. Densímetro nuclear – transmisión directa

En el modo de Retrodispersión, los fotones gamma deben ser dispersados (o reflejados) por lo menos una vez, antes de alcanzar a los detectores en la sonda. Para efectuar este proceso, se coloca la varilla de manera que, la fuente y los detectores se encuentran en el mismo plano, denominado posición de Retrodispersión. Los fotones provenientes de la fuente penetran en el material, y los que se dispersan son medidos por los detectores. A fin de evitar que los fotones puedan acceder a los detectores directamente, sin ser dispersados por el material, la sonda dispone de blindajes entre la fuente y los detectores.

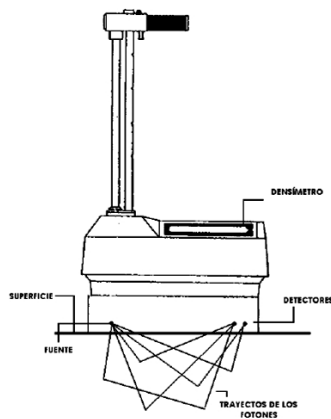


Gráfico Nº 7. Densímetro nuclear – retrodispersión

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

2.4.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO

El sistema de clasificación American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Designación ASTM D-3282; método AASHTO M145) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928. Este sistema pasó por varias revisiones y actualmente es usado para propósitos ingenieriles enfocados más en el campo de las carreteras como la construcción de los terraplenes, sub-rasantes, subbases y bases de las carreteras. Sin embargo es necesario recordar que un suelo que es bueno para el uso de sub-rasantes de carreteras puede ser muy pobre para otros propósitos.

Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo varía inversamente con su índice de grupo, es decir que un suelo con índice de grupo igual a cero indica que es material “bueno” para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material “muy malo” para la construcción de carreteras.

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Los suelos que tienen más del 35% de partículas que pasan a través del tamiz N° 200 se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son principalmente limo y materiales de tipo arcilla.

El sistema de clasificación AASHTO presenta las siguientes características:

- Características del sistema de clasificación AASHTO (ASTM D-3282)
- Procedimiento de clasificación AASHTO

- Cálculo del índice de grupo

En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2,..., A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices N° 200, 40 y 10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz N° 40. Estos siete grupos se corresponden a dos grandes categorías de suelos, suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz N° 200) y suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz N° 200).

La categoría de los suelos granulares; gravas, arenas y zahorras; está compuesta por los grupos A-1, A-2 y A-3, y su comportamiento en explanadas es, en general, de bueno a excelente, salvo los subgrupos A-2-6 y A-2-7, que se comportan como los suelos arcillosos debido a la alta plasticidad de los finos que contiene, siempre que el porcentaje de estos supere el 15%. Los grupos incluidos por los suelos granulares son los siguientes:

- A-1: Corresponde a una mezcla bien graduada de gravas, arenas (gruesa y fina) y finos no plásticos o muy plásticos. También se incluyen en este grupo las mezclas bien graduadas de gravas y arenas sin finos.
- A-1-a: Incluye los suelos con predominio de gravas, con o sin material fino bien graduado.
- A-1-b: Incluye suelos constituidos principalmente por arenas gruesas, con o sin material fino bien graduado.
- A-3: Corresponde, típicamente, a suelos constituidos por arena fina de playa o de duna, de origen eólico, sin finos limosos o arcillosos o con una pequeña cantidad de limo no plástico. También incluyen este grupo, los depósitos fluviales de arena fina mal graduada con pequeñas cantidades de arena gruesa o grava.

- A-2: Este grupo comprende a todos los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz N° 200 y que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 y A-3, debido a que el porcentaje de finos o la plasticidad de estos (o ambas cosas) están por encima de los límites fijados para dichos grupos. Por todo esto, este grupo contiene una gran variedad de suelos granulares que estarán entre los correspondientes a los grupos A-1 y A-3 y a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
- A-2-4 y A-2-5: En estos subgrupos se incluyen los suelos que contienen un 35% o menos de material que pasa por el tamiz N° 200 y cuya fracción que pasa por el tamiz N° 40 tiene las características de los grupos A-4 y A-5, de suelos limosos. En estos subgrupos están incluidos los suelos compuestos por grava y arena gruesa con contenidos de limo o índices de plasticidad por encima de las limitaciones del grupo A-1, y los suelos compuestos por arena fina con una proporción de limo no plástico que excede la limitación del grupo A-3.
- A-2-6 y A-2-7: En estos subgrupos se incluyen suelos como los descritos para en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que los finos contienen arcilla plástica con tienen las características de los grupos A-6 y A-7.

La categoría de los suelos limo-arcillosos está compuesta por los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, cuyo comportamiento en explanadas va de regular a malo. En esta categoría los suelos se clasifican en los distintos grupos atendiendo únicamente a su límite líquido y a su índice de plasticidad, según las zonas del siguiente gráfico de plasticidad. De esta forma se clasifican también los suelos del grupo A-2 en los distintos subgrupos.

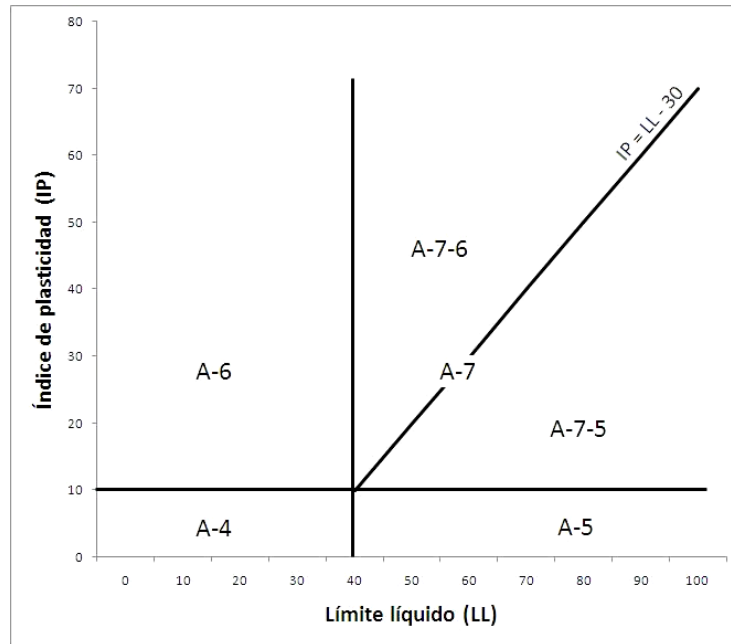


Gráfico N° 8. Carta de plasticidad. AASHTO

Los grupos incluidos en los suelos granulares son los siguientes:

- A-4: El suelo típico de este grupo es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo los suelos constituidos por mezclas de suelo fino limosos y hasta un 64% de gravas y arenas.
- A-5: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-4, salvo que suele tener carácter diatomáceo o micáceo, y pueden ser muy compresibles, como indica su elevado límite líquido.
- A-6: El suelo típico de este grupo es un suelo arcillosos plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz N° 200. También se incluyen en este grupo las mezclas de suelo fino arcilloso y hasta un 64% de gravas y arenas. Estos suelos, experimentan generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

- A-7: El suelo típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-6, salvo que tiene las características de elevado límite líquido del grupo A-5, y puede ser elástico y estar sujeto a grandes cambios de volumen
- A-7-5: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad moderado en relación con el límite líquido y que pueden ser altamente compresibles, además de estar sujetos a importantes cambios de volumen
- A-7-6: Se incluyen en este subgrupo los suelos con un índice de plasticidad elevado en relación con el límite líquido y que están sujetos a cambios de volumen muy importantes

La clasificación realizada de esta manera se complementa con el índice de grupo, que permita caracterizar mejor cada suelo dentro de los grupos, ya que estos admiten suelos con porcentajes de finos y plasticidad muy diferentes. El índice de grupo se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$IG = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F - 15) (IP - 10)$$

Ecuación N° 3. Cálculo del Índice de Grupo

Siendo:

F = Porcentaje en peso que pasa por el tamiz N° 200 del material inferior a 75 mm, expresado en número entero

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

El índice de grupo se expresa en números enteros positivos (un número negativo se expresará como $IG = 0$) y se escribe entre paréntesis a continuación de los símbolos de grupo o subgrupo correspondientes, por ejemplo A-2-4 (0). Generalmente cuanto menor es el IG de un suelo, mejores son las cualidades del suelo como explanada o capa de asiento del firme. Los suelos de los grupos A-1, A-3, A-2-4 y A-2-5, que pueden calificarse de buenos a excelentes, tienen un $IG = 0$. Un $IG = 20$ o mayor corresponde a un suelo de muy mala calidad, en condiciones medias de drenaje y compactación. El valor crítico de finos es $F = 35$ con independencia de la plasticidad, y si el índice de plasticidad es superior a 10 este valor será $F = 15$. Los valores críticos del límite líquido y del índice de plasticidad serán, respectivamente, 40 y 10. Por último, hay que señalar que para calcular el IG de los subgrupos A-2-6 y A-2-7 sólo se considera el segundo sumando de la expresión.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz N° 200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz N° 200)			
	A - 1		A - 3 ^A	A - 2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
N° 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 40 (425 µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
N° 200 (75 µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosos				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2

^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30

Tabla N° 2. Sistema de clasificación AASHTO

2.4.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS

La determinación y cuantificación de las diferentes propiedades de un suelo, efectuadas mediante los ensayos vistos anteriormente, tienen como objetivo último el establecimiento de una división sistemática de los diferentes tipos de suelos existentes atendiendo a la similitud de sus caracteres físicos y sus propiedades geomecánicas.

Una adecuada y rigurosa clasificación permite al ingeniero de carreteras tener una primera idea acerca del comportamiento que cabe esperar de un suelo como cimiento del firme, a partir de propiedades de sencilla determinación; normalmente, suele ser suficiente conocer la granulometría y plasticidad de un suelo para predecir su comportamiento mecánico. Además, facilita la comunicación e intercambio de ideas entre profesionales del sector, dado su carácter universal.

Fue Casagrande quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que fue empleado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

Diez años más tarde, y vista la gran utilidad de este sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Dicha clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades.

En el siguiente esquema se muestran dichos símbolos y su significación:

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Mal gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo(<50)	H

Tabla Nº 3. Prefijos y sufijos del suelo. Gonzales

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
GW	GRAVAS (>50% en tamiz Nº4 ASTM)	Limpias	Bien gradada
GP		(Finos <5%)	Mal gradada
GM		Con finos	Componente limoso
GC		(Finos>12%)	Componente arcilloso
SW	ARENAS (<50% en tamiz Nº4 ASTM)	Limpias	Bien gradada
SP		(Finos <5%)	Mal gradada
SM		Con finos	Componente limoso
SC		(Finos>12%)	Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

Tabla Nº 4. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo. Gonzales

Como puede deducirse de la anterior Tabla, existe una clara distinción entre tres grandes grupos de suelos:

- a. Suelos de grano grueso (G y S): Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz Nº 200 ASTM

- b. Suelos de granos fino (M y C): Formados por suelos con al menos un 50% que pasa el tamiz N° 200, de contenido en limos y arcillas
- c. Suelos orgánicos (O, Pt): Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación

Los suelos gruesos a su vez se dividen en dos grandes grupos: gravas (G), y arenas (S). El criterio para separarlos es otra vez granulométrico: si más del 50% de la fracción gruesa se retiene en el tamiz N° 4, es una grava y si el 50% o un porcentaje mayor de la fracción gruesa para el tamiz N° 4, es una arena.

Asimismo, dentro de la tipología expuesta pueden existir casos intermedios, empleándose una doble nomenclatura; por ejemplo, una grava bien gradada que contenga entre un 5% y 12% de finos se clasificará como GW-GM.

Los suelos finos, atendiendo a sus condiciones de plasticidad (directamente relacionada con las propiedades mecánicas del suelo fino) y a su contenido orgánico (también influyente en su comportamiento) se dividen en otros tres grandes grupos. El primero está constituido por los suelos no plásticos o poco plásticos llamados Limos (prefijo M, del sueco mo a mjala); el segundo incluye los suelos plásticos denominados Arcillas (prefijo C, de clay), y el tercero corresponde a los suelos orgánicos (prefijo O, de organic).

Establecidos así los seis grandes grupos: gravas, arenas, limos, arcillas, orgánicos y muy orgánicos, pasamos a detallar la conformación de los siguientes grupos:

Clasificación de las Gravas

Para el caso en que el contenido de finos sea menor al 5% y mayor al 12%, se pueden tener 4 posibles dobles símbolos:

- **GW-GM**, grava bien gradada con limo
- **GW-GC**, grava bien gradada con arcilla
- **GP-GM**, grava mal gradada con limo
- **GP-GC**, grava mal gradada con arcilla

Bien gradada si: $C_u \geq 4$, $1 \leq C_c \leq 3$ y mal gradada si no cumplen con estos requisitos.

Los correspondientes ensayos de granulometría y plasticidad permitirán definir cuál de estos dobles símbolos es el correcto para un cierto suelo analizado.

Clasificación de las Arenas

Se sigue un procedimiento análogo al de las gravas. Así, si la fracción fina es del 5% o menos, ésta ya no tiene influencia, pero si es mayor al 12%, la influencia es decisiva. Nacen los grupos de arenas limpias y arenas sucias.

- **SW-SM**, arena bien gradada con limo
- **SW-SC**, arena bien gradada con arcilla
- **SP-SM**, arena mal gradada con limo
- **SP-SC**, arena mal grada con arcilla

Arenas bien gradadas si: $C_u \geq 6$, $1 \leq C_c \leq 3$ y arenas mal gradadas si no cumplen con estos requisitos.

Igualmente, los ensayos de granulometría y plasticidad ejecutados sobre la fracción fina del suelo analizado permitirán definir cuál de estos doble símbolos es el correcto para cada caso.

Clasificación de los suelos finos: La Carta de Plasticidad de Casagrande

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

Línea A: $IP = 0.73 (LL - 20)$

Línea B: $LL = 50$

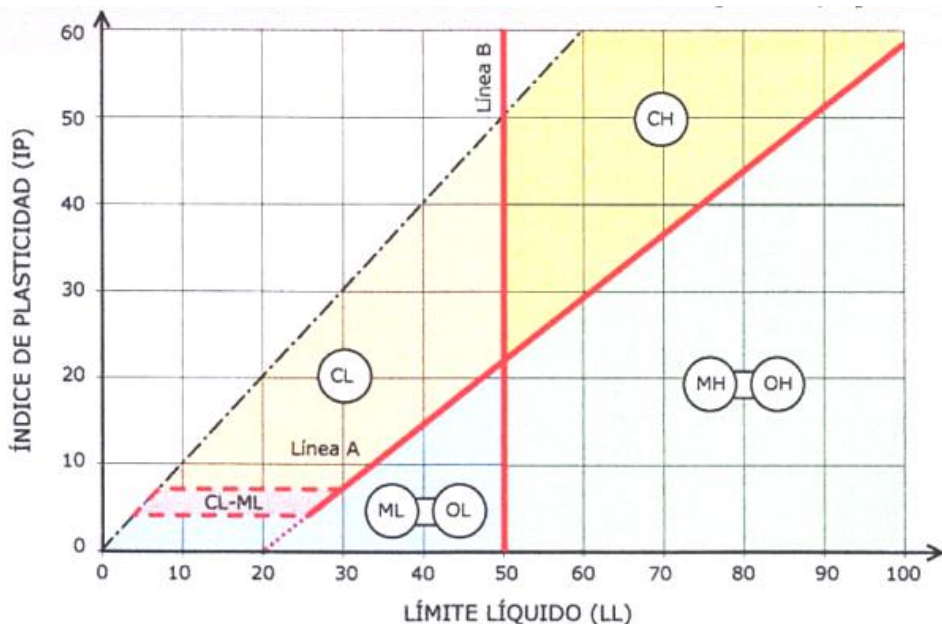


Gráfico N° 9. Carta de Plasticidad Casagrande

Si un suelo grueso, grava o arena, tiene una fracción fina cuyo porcentaje oscile entre 5% y 12%, y además los ensayos indican que esta fracción fina cae en la zona CL-ML, el segundo símbolo será el de una arcilla (GC o SC), y la condición de frontera se indicará en el nombre. Por ejemplo una arena mas gradada con 10% de finos, cuyo límite líquido es 20% y su índice de plasticidad es 6%, se clasificará como **SP-SC** y se llamará arena mal gradada con arcilla limosa. Recuérdese siempre que en el SUCS no existe triple símbolo ni otros dobles símbolos aparte de los ya indicados.

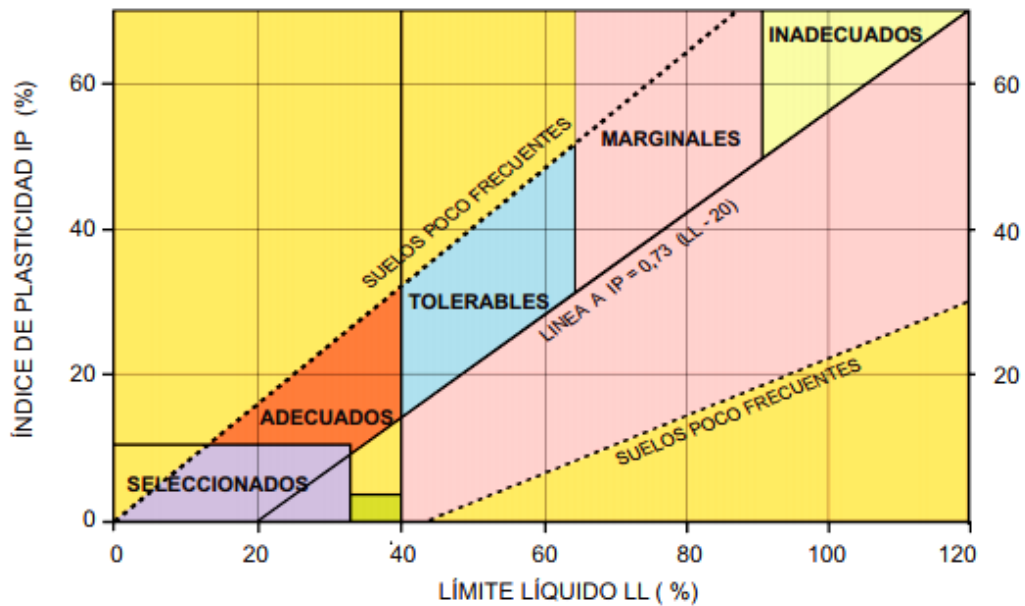


Gráfico Nº 10. Caracterización de los suelos

2.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS

2.5.1 RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

El Ensayo de Relación de Soporte de California (California Bearing Ratio: CBR) mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para sub-rasante, sub base y base de pavimentos, puede ser realizado “in situ” o en laboratorio. Es, posiblemente, el ensayo más utilizado en todo el mundo para estimar la capacidad de soporte de una explanada, factor básico para el dimensionamiento de los pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad.

Este es uno de los parámetros necesarios obtenidos en los estudios geotécnicos previos a la construcción, como también lo son el Ensayo Proctor y los análisis granulométricos del terreno.

Se compacta una muestra de suelo, con la humedad y energía de compactación deseada, en un molde cilíndrico de 152,4 mm de diámetro interior y 177,8 mm de altura, provisto con un collar supletorio y una base

perforada. Esta muestra se sumerge en agua durante 4 días con una sobrecarga que ocasiona una compresión equivalente a la del futuro firme sobre el pavimento, midiéndose el hinchamiento vertical, que se expresa en porcentaje de la altura de la muestra.

La muestra se sumerge para poder preveer la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción.

La muestra se ensaya a penetración mediante una prensa y un pistón cilíndrico de 49,6 mm de diámetro, que se desplaza a 1,27 mm/min a velocidad uniforme. El Índice resistente CBR se define como la razón, en porcentaje, entre la presión necesaria para que el pistón penetre en el suelo hasta una profundidad determinada y la correspondiente a esa misma penetración en una muestra patrón de grava machacada. Se obtiene este índice para dos penetraciones, de 2,54 mm y 5,08 mm, tomándose como índice CBR el mayor valor.

La gráfica obtenida por lo general es una curva con el tramo inicial recto y el tramo final cóncavo hacia abajo; cuando el tramo inicial no es recto se le corrige.

Con la gráfica observamos los valores de la carga que soportaba el suelo cuando el pistón se había hundido 2.5 mm y 5mm y los expresamos en tanto por ciento (%), tomando como índice CBR el mayor de los porcentajes calculados.

2.6 ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS

La estabilización de los suelos es una técnica cuyo fin es modificar sus características mediante la incorporación de un conglomerante para permitir su aprovechamiento. Los objetivos directos que se obtienen suelen ser:

- Permitir el aprovechamiento de suelos de la traza de deficiente calidad, evitando su extracción y transporte a vertedero así como el

tener que aportar otros diferentes que en ocasiones pueden hallarse a distancias importantes.

- Reducir la sensibilidad al agua de los suelos, y con ello aumentar su resistencia a la erosión, a la helada, y a otros agentes climáticos.
- Permitirla circulación por terrenos intransitables.
- Obtener una plataforma estable de apoyo del firme que colabore estructuralmente con el mismo

El aprovechamiento de los suelos existentes mediante la estabilización, incluso en el caso de suelos marginales o contaminados, evita la reducción de los recursos naturales disponibles al disminuir el empleo de suelos de mejor calidad.

Por otra parte, se suprimen las operaciones de remoción de los suelos existentes y su transporte a vertedero, así como las de extracción y transporte a obra de los suelos que los sustituyen.

Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas, se suman importantes beneficios económicos.

2.6.1 ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS CON ENZIMAS ORGÁNICAS

La enzima es de origen orgánico, acelera la velocidad de una reacción química, que de otra manera se realizaría muy lentamente, la enzima no se convierte ni forma parte del producto final sino que conserva sus características originales.

La enzima es un estabilizador no tóxico del suelo, utilizado en suelos arcillosos que reduce los costos de mantenimiento de caminos debido al

incremento y duración de la compactación y valores de tensión que resultan de la aplicación del producto.

El uso de enzimas como estabilizadores no ha sido sujeto a ningún desarrollo o especificación técnica y su uso se lleva a cabo bajo datos empíricos basados en experiencias previas. No está claro exactamente bajo qué condiciones trabajan estos productos y debido a ello es muy importante estudiar y determinar los efectos de las enzimas sobre la estructura de los diferentes tipos de suelos.

La función principal del aditivo es, expulsar o prevenir la absorción de agua.

La aplicación de la enzima a un suelo aplicable tendrá como resultado valores más altos de CBR (una medida de tensión del suelo) y permitirá el uso de materiales marginales del suelo, por lo tanto reducirá la dependencia estándar en agregados y gravas. El suelo estabilizado tendrá una permeabilidad más baja debido al incremento de la densidad del suelo, teniendo como resultado un camino más duradero en tiempo seco y húmedo. La enzima es 100% biodegradable y deriva su eficacia en la fracción de arcilla del suelo. Después de la aplicación de la enzima las partículas de arcilla presentes en el suelo ya son no atraídas por el agua, permitiendo que el agua en el suelo drene libremente teniendo como resultado el asentamiento de partículas de arcilla/suelo más juntas y produciendo los últimos efectos de estabilización del suelo.

La enzima está disponible en forma líquida y es aplicado utilizando equipo y técnicas estándar. Una vez que es aplicado, reducirá la tendencia de un camino a exhibir varios problemas comunes de mantenimiento como superficies corrugadas al lavado, roturas, formación de tiras, huecos y polvo. El producto es súper concentrado, por lo tanto hace que el costo del producto sea insignificante por kilómetro o milla de camino tratado comparado a otros productos alternativos o costos estándar por mantenimiento de caminos de grava no estabilizados. Es utilizada principalmente para estabilizar la base de un camino sin sellarlo pero

también puede ser utilizado como un estabilizador de suelo bajo pavimento de cualquier tipo.

El porcentaje de compactación que puede esperarse, puede alcanzar hasta un 20% superior al conseguido con los métodos normales de construcción de caminos, su efecto reduce tanto los costos de construcción, como los de mantenimiento. La enzima utiliza como ligante los finos cohesivos no granulares, el material de sub-rasante a usar debe tener un alto contenido de finos.

Esto permite hacer uso de materiales de menor costo, incluso aprovechar el material existente en ciertos caminos. Los costos de mantenimiento se reducen considerablemente ya que una sub-rasante tratada con enzimas resulta menos permeable que una convencional, que aumentando la densidad del suelo, presenta una superficie con mayor resistencia al lavado de partículas finas y a la erosión.

2.6.1.1 ESTABILIZACIÓN EN CAMINOS VECINALES

Los caminos interiores regularmente son construidos en terrenos que contienen una vasta gama de materiales granulométricos generalmente, con un alto contenido de finos que pasen el tamiz N° 200, que normalmente causan problemas de estabilización. La aplicación de enzimas orgánicas ayuda eficazmente a cementar éstas, con material de mayor tamaño, produciendo una capa densa altamente compacta. Los caminos tratados con enzimas son resistentes a la penetración del agua lo cual garantiza un camino de mayor calidad con un mínimo de mantenimiento.

2.6.1.2 CONSTRUCCIÓN DE UN CAMINO O VÍA

La dosificación recomendada es de 1 litro para tratar 30 m³ de material compacto; se agrega al agua necesaria contenida en un carro-tanque, la cual seguidamente es aplicada en forma de riego al material para luego

ser mezclada, extendida y compactada. La cantidad de agua en la cual será diluida la enzima dependerá de las condiciones del terreno a tratar y su humedad óptima de compactación. La construcción de un camino deberá efectuarse en capas no mayores de 30 cm y dependiendo de la maquinaria a utilizar en su compactación. Se recomienda utilizar capas de 15 cm mínimo para obtener una compactación óptima. Se debe poner mucha atención en el contenido de humedad y la forma de mezclado para obtener una distribución uniforme en el material del camino. En todo caso si se requiere solamente una capa estabilizada, esta deberá ser de mínimo 17 cm., las enzimas orgánicas también es utilizado para el sellamiento de la base granular en los caminos terciarios, controlando la pérdida de finos. Se aplica en una solución de 1,0 parte de enzima por 10.000 partes de agua. Este tratamiento es altamente efectivo reduciendo los finos en suspensión producto del tráfico vehicular, evitando así los tratamientos temporales y las grandes cantidades de agua que se requieren normalmente para controlar este problema.

Los suelos aplicados este tratamiento, alcanzan su mayor capacidad estructural en el momento de su compactación y durante el subsiguiente período de curado, es decir 72 horas. El fuerte enlace de las partículas de suelo se realiza en presencia de humedad y energía de compactación. Esta condición permanecerá tanto como el material pueda resistir fuerzas externas. Cargas pesadas de ejes, el agua y ciclos de congelamiento y deshielo tienen algún efecto en todos los caminos finalmente. Los suelos tratados resisten estas fuerzas debido a la cementación y alta densidad producida en el material granular. El camino soportará los efectos perjudiciales de la erosión y de las fuerzas mecánicas que actúen sobre él. Los agrietamientos en el material de los caminos tratados se deben principalmente a dos factores:

- a. Si el material tiene un alto contenido de arcillas expansivas (con un alto factor de contracción / expansión). En estos casos los caminos recién terminados pueden presentar algunas fisuras, esto significa que la capacidad de soporte es insuficiente (Sub-rasante) lo cual

se corrige aumentando el espesor de la base, manejando el sistema de drenaje y con el uso de la enzima controlará las grietas o fisuras ocasionadas cuando las arcillas expansivas entran en contacto con el agua

- b. Cuando los finos arcillosos bajo tamiz N° 200 exceden de un 25% o son altamente expansivas, puede presentarse un agrietamiento superficial. Estas grietas o fisuras son generalmente superficiales y son rellenadas con pequeñas partículas del material existente con el tránsito usual del camino, no afectando significativamente la estabilidad de éste

Los caminos tratados han estado en uso por más de 10 años. La vida útil de un camino depende de varios factores:

- a. Condiciones climáticas tales como las precipitaciones y las variaciones de temperatura.
- b. Calidad del suelo usado en la construcción
- c. Diseño vial, drenajes, TPDA
- d. Tipo de tráfico vehicular, velocidades y uso
- e. Capa de rodadura (si es que se ha aplicado)
- f. Mantenimiento general (frecuencia y calidad)

2.6.1.3 CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS PROVISORIOS

Se debe usar siempre a razón de 1,0 litro por cada 30 m³ de suelo compacto. Para caminos provisorios se debe considerar una reducción en

los espesores, teniendo en cuenta siempre, que las cargas por ejes proyectadas no destruyan prematuramente el camino.

Materiales

Los materiales por estabilizar podrán ser triturados, cribados o una mezcla de ambos y deberán estar exentos de materia orgánica y cualquier otra sustancia perjudicial. Durante la ejecución de las obras, la granulometría se controlará en terreno tomando el material acordonando antes de procesarlo.

Resistencia a la abrasión

La fracción gruesa del material por estabilizar deberá presentar un desgaste no mayor de cincuenta por ciento (50%) al ser ensayado en la máquina de los Ángeles.

Compuesto multienzimático orgánico

El producto se presenta en forma líquida y no implica riesgos de contaminación, ni peligro para la salud de seres vivos.

Equipos

Los equipos necesarios para la ejecución de los trabajos básicamente son; una moto niveladora con escarificadores, carro tanque provisto de bomba hidráulica y flauta de irrigación, vibro compactador puede ser de rodillo a neumáticos. Todos los elementos de los equipos que se vayan a emplear deberán tener aprobación previa normativa y encontrarse en condiciones satisfactorias hasta la terminación de los trabajos.

2.6.1.4 EJECUCIÓN DE LOS TRABAJOS

Diseño de la Mezcla

Con suficiente antelación al inicio de los trabajos, se extraerán muestras de los materiales que se propone utilizar, avaladas por los resultados de ensayos de granulometría, límites de plasticidad, Proctor modificado y relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de Laboratorio)

Preparación de la superficie existente

Si el material por estabilizar es totalmente de aporte, antes de construir la sub-rasante estabilizada se comprobará que la superficie que va a servir de apoyo tenga la densidad y lisura apropiadas. En caso de que la construcción se vaya a realizar únicamente con el suelo existente, éste se deberá escarificar en todo el ancho de la capa que se va a estabilizar, hasta la profundidad de diseño. Si se contempla la adición de un suelo de aporte para mejorar el existente, este deberá colocarse en la vía antes de iniciar la distribución del estabilizante. En todos los casos en que el proceso involucre el suelo del lugar, parcial o totalmente, deberá comprobarse que el material que se encuentre bajo el espesor por estabilizar presente adecuadas condiciones de resistencia.

Aplicación

Se aplica diluido en el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima de compactación con una tolerancia de hasta -2% de humedad, esta mezcla de enzima / agua debe ser aplicada a razón de 1,0 litro por cada 30 m^3 de material compacto, regando la solución de enzima / agua uniformemente al material escarificado por medio de un carro tanque irrigador.

Mezcla

Después de aplicar la mezcla de enzima / agua, se efectúa la mezcla en todo el espesor indicado en los diseños elaborados, empleando para ello la moto niveladora, moviéndolo de un lado al otro de la vía, conformando un cordón en el extremo de la vía, luego se pasará el cordón al extremo opuesto; este procedimiento se debe repetir hasta que la mezcla este lo más homogéneamente posible. Si durante el proceso de homogenización de la mezcla de suelo mas aditivo se observa húmedo, debe dejarse orear; si por el contrario está demasiado seco, se le añadirá agua para lograr la humedad óptima de compactación. Si durante la construcción del tramo, y en el proceso de homogenización de la mezcla se presente cualquier tipo de inconveniente, este mezcla de suelo más aditivo, puede dejarse acordonada al extremo de la vía no más de 72 horas, en caso que se requiera humedad después de las 72 horas, se debe aplicar una solución de enzima / agua a razón de 1:10.000 para reactivar la enzima aplicada con anterioridad. El número de pasadas de la moto-niveladora conformando el cordón de material será el necesario para obtener una mezcla homogénea. Una vez el material se observe homogéneo se traslada el material del extremo de la vía al centro de la misma, para conformar la sub-rasante estabilizada garantizando las pendientes requeridas antes de proceder a la compactación.

Compactación

Después de extendida el suelo tratada, éste será compactado longitudinalmente, empezando por el borde externo o inferior y desplazando el rodillo vibratorio hacia la parte superior del camino. Cada pasada deberá traslapar por lo menos en 1/3 longitud de tambor vibratorio. La primera pasada que se realice con el vibro-compactador debe ser sin la energía de compactación con el fin de planchar la sub-rasante tratada y corregir las irregularidades en la vía. Se utilizará la vibración sólo hasta 2 pasadas, procediendo posteriormente sólo al

planchado del material. Un rodillo de ruedas neumáticas puede dar una buena terminación y densificación adicional. El porcentaje de humedad del material de sub-rasante durante su compactación deberá ser aproximadamente 2 puntos / porcentuales bajo la humedad óptima determinada en el laboratorio. El extendido y compactado deberá ejecutarse dentro de las 14 horas siguientes al mezclado del material granular con la solución enzima / agua.

Juntas de trabajo

Las juntas entre trabajos realizados en días sucesivos deberán cuidarse para proteger la continuidad de la sub-rasante estabilizada en la jornada anterior. Al efecto, al inicio de la jornada siguiente se debe ir profundizando en la escarificación el material compactado el día anterior por lo menos dos metros atrás del inicio de la jornada.

Curado

Una vez terminados los procesos de homogenización y compactación de la sub-rasante tratada, y si esta se va a convertir en superficie de rodadura, se debe colocar un riego de enzima / agua a razón de 1:10.000; este riego será colocado después de haber transcurrido el período de curado de 72 horas. Si se desea utilizar asfalto u otro material superficial como superficie de rodadura, se logrará una mejor cohesión entre las capas humedeciendo la superficie ya compactada. Esta aplicación superficial puede ser realizada luego de un período de curado de 72 horas. En el caso que por necesidades constructivas la sub-rasante estabilizada se compacte en más de dos capas, antes de extender y compactar la capa siguiente, se debe humedecer la capa compactada con una solución de enzima / agua a razón de 1:10.000; para luego extender la siguiente capa y proceder a compactar.

Apertura del tránsito

Una vez que la superficie de la vía se encuentre compactada a la densidad de diseño, está lista para ser utilizada, los suelos tratados con enzimas, alcanzan su mayor capacidad estructural en el momento de su compactación y durante las 72 horas subsecuentes. La apertura del tráfico una vez se terminen los trabajos de compactación mejorará el sellado de la vía.

Limitaciones climáticas

Las sub-rasantes tratadas con enzimas no deben colocarse cuando la temperatura ambiente está bajo los 4°C, o cuando las condiciones indiquen que la temperatura puede bajar de 1°C, dentro de las 24 horas siguientes. Así mismo cuando la Sub-rasante y/o los agregados pétreos presenten grado de congelamiento, no podrá ejecutarse el tratamiento de la base.

2.6.1.5 CONDICIONES PARA EL RECIBO DE LOS TRABAJOS

Durante la ejecución de los trabajos, se tomara en cuenta los siguientes controles principales:

- Verificar el estado y funcionamiento de todos los equipos empleados antes de iniciar cada jornada de trabajo
- Comprobar que los materiales cumplen con los requisitos de calidad exigidos de las especificaciones, tomando el material del cordón extendido en el centro de la vía, después de que este se encuentre homogenizado, previo a la extensión y compactación
- Determinar la humedad del material una vez escarificado al inicio de cada jornada, para calcular la cantidad de agua de en la que se

va a diluir los litros o galones de enzima a aplicar, con base en la Tabla de dilución suministrado en los diseños de la sub-rasante estabilizada

- Supervisar la correcta aplicación de la enzima por parte de un ingeniero, a la persona que el Constructor designe en el momento de la explicación del método de trabajo
- Ejecutar ensayos de compactación en el laboratorio
- Verificar la densidad de las capas compactadas efectuando la corrección previa por partículas de agregado grueso, siempre que ello sea necesario. Este control se realizará en el espesor de capa realmente construida de acuerdo con el proceso constructivo aplicado
- Tomar medidas para determinar espesores y levantar perfiles y comprobar la uniformidad de la superficie
- Vigilar la regularidad en la producción de los agregados de acuerdo con los programas de trabajo

Condiciones específicas para el recibo y tolerancia

Se debe garantizar el almacenamiento de las canecas de enzima en un lugar donde la temperatura ambiente no supere los 45° C, si el producto se congela no sufre ninguna alteración.

Una vez abierta la caneca, esta debe consumirse en el menor tiempo posible, y no permitir a la persona que esté realizando la aplicación abrir otra caneca sin antes haber consumido la anterior.

Calidad del agua

Verificar diariamente antes de disolver la cantidad de enzima a aplicar, que el agua este limpia y libre de materia orgánica.

2.6.1.6 CALIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Verificar periódicamente que las características de los materiales establecidos en la obra cumplan la especificación, se tomarán muestras periódicas una vez el material se encuentre homogenizado con la enzima para determinar:

- La plasticidad
- La compactación por el ensayo modificado de compactación (Proctor Modificado)

Si dentro de los diseños se contempla ajuste granulométrico al material que se está estabilizando, también se efectuaran las verificaciones periódicas descritas anteriormente, después de realizar la mezcla.

2.6.1.7 CALIDAD DE LA MEZCLA

Para determinar la resistencia de la sub-rasante estabilizada se pueden realizar los ensayos CBR “in situ” después de las 72 horas de curado. De la mezcla elaborada en obra, se moldearan probetas para determinar el CBR de laboratorio, dejando las probetas con la precarga durante las 72 horas siguientes a la compactación, para luego ser ensayadas.

2.6.1.8 CALIDAD DEL PRODUCTO TERMINADO

La capa terminada deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas.

La distancia entre el eje del proyecto y el borde de la capa que se esté construyendo no podrá ser menor que la señalada en los planos. La cota de cualquier punto de la capa compactada no deberá variar en más de diez milímetros (10 mm) de la proyectada. Además, se deberá realizar los siguientes controles:

- a. Compactación: Las determinaciones de densidad de la capa compactada se efectuarán después de las 72 horas de curado, en una proporción de cuando menos una (1) por cada doscientos cincuenta metros cuadrados (250 m^2) y los tramos por aprobar se definirán sobre la base de un mínimo de seis (6) determinaciones de densidad. Los sitios para las mediciones se escogerán al azar. La densidad de las capas compactadas podrá ser determinada por cualquier método. Se debe exigirle al Laboratorio de Suelos que realice las pruebas, una vez terminada estas, tapar los huecos con material que se encuentre homogenizando más adelante. En el caso de que no se tenga material homogenizado, se deberán recoger 30 Kg del mismo material de la sub-rasante estabilizada y mezclarlo con una solución de enzima / agua; 1,0 c.c. de enzima para 30 kilogramos de suelo; con esta mezcla se deben tapar los huecos y compactarlos. Por ningún motivo se deben dejar los huecos destapados.
- b. Espesor: Sobre la base de las perforaciones efectuadas para el control de la compactación, se deberá verificar el espesor medio de la capa compactada, el cual no podrá ser inferior al de diseño. Además, el espesor obtenido en cada determinación individual deberá ser, por lo menos, igual al noventa por ciento (90%) del espesor de diseño, admitiéndose un solo valor por debajo de ese límite.
- c. Lisura: La capa terminada deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas. Cuando la cantidad de material que pasa el tamiz N° 200 se

encuentre por encima del 30%, y para evitar que la superficie de la estructura estabiliza quede demasiado lisa, se recomienda antes de la compactación regar un material granular constituido por grava de trituración o de río cuyo tamaño esté comprendido entre 3/8" a 1" para darle mayor fricción a la capa terminada.

2.6.1.9 MEDIDA

La unidad de medida será el metro cúbico (m^3), de material o mezcla suministrado, colocado y compactado, a satisfacción del Interventor, de acuerdo con lo que exija la especificación respectiva. El volumen se determinará por el sistema promedio de áreas extremas, utilizando las secciones transversales y la longitud real, medida a lo largo del eje del proyecto multiplicado por el espesor de estabilización. El valor por metro cúbico estabilizado debe incluir los galones de enzima y el material necesario para el ajuste granulométrico en el caso de que lo hubiere.

2.6.2 ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS CON CEMENTO

El cemento, mezclado íntimamente con el suelo desarrolla una red de enlaces durante las reacciones de hidratación que proporciona a la mezcla, una buena capacidad de soporte e incluso, con la dotación adecuada, una cierta resistencia mecánica a corto plazo, y mejora tanto su durabilidad, entendiéndose por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como su estabilidad dimensional.

La gama de suelos que se pueden estabilizar con cemento es muy amplia. Aunque son los suelos granulares los que presentan una mejor y más rápida mejora de resultados ante una reducida aportación de cemento, no se debe a priori eliminar otros tipos, pues se dan casos de suelos de elevada plasticidad cuyo comportamiento es mejor al ser mezclados con cemento que con cal.

Con suelos muy finos y arcillosos suele resultar más adecuado realizar un tratamiento mixto cal-cemento: la aplicación de la cal logra reducir la plasticidad y consigue agrupar los finos en granos de mayor diámetro sobre los que sí puede actuar el cemento, lográndose obtener una resistencia apreciable.

Análogamente se puede emplear este doble tratamiento en suelos muy húmedos, donde la cal actúa secando. En la estabilización mixta, antes de la aplicación del cemento, conviene dejar un período de actuación de la cal de al menos 5 o 6 horas (plazo que se debe definir en los ensayos previos)

Se trata de cementos con inicio y final de fraguado suficientemente largos (mayor plazo de trabajabilidad), moderado calor de hidratación (limitada fisuración por retracción) y desarrollo inicial de resistencias lento, o mejoran a largo plazo. Con ello se limita el efecto de la retracción.

2.6.2.1 MECANISMO DE LA ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

La estabilización de un suelo para obtener una explanada de calidad requiere realizar previamente los estudios de laboratorio oportunos para cada caso en particular. Las características del suelo (tipo, clasificación, grado de humedad, u otros) y la maquinaria disponible, son dos parámetros básicos que definen la forma de estabilizar y la cantidad de conglomerante más apropiada para conseguir las óptimas condiciones técnicas y económicas.

Así, se pueden diferenciar las siguientes fases en una estabilización:

- a. clasificación del suelo: El primer paso, consiste en realizar los ensayos previos para caracterizar correctamente el suelo. Para ello, se toman muestras suficientemente representativas del suelo (se excava en las zonas de desmonte hasta la cota de explanada y se cogen muestras válidas de los materiales de aportación de los terraplenes) y se llevan a cabo los ensayos de identificación. Al

menos se debe definir la granulometría, la plasticidad (límites de Atterberg), el hinchamiento, la humedad natural, el contenido de materia orgánica y el de otros componentes perjudiciales, tales como sulfuros (piritas), sulfatos (yesos) o cloruros que puedan perturbar o incluso impedir el fraguado del cemento

- b. Ensayos previos: Definido el conglomerante, se realizan los ensayos de dosificación necesarios para conocer la cantidad del mismo a aportar. Para ello se realiza para cada contenido de cemento (o para un porcentaje medio) el ensayo Proctor Modificado siguiendo la norma y se determina la humedad óptima y la densidad máxima de compactación. Posteriormente se obtiene el valor del índice CBR o, en el que se exige una resistencia de 1,5 MPa a la edad de 7 días, se confeccionan probetas para ensayar a compresión a dicha edad

La fórmula de trabajo debe indicar al menos:

- La granulometría del suelo, los límites de Atterberg y las demás características definidas anteriormente
- La humedad óptima del material en el momento del mezclado
- La densidad a obtener, que no debe ser inferior al 97% de la máxima Proctor modificado
- El tipo y dotación de cemento a utilizar

Dada la variabilidad de las características de los suelos que pueden encontrarse en un firme, es aconsejable para asegurar una homogeneización correcta que la dotación de cemento no sea inferior al 3% a fin de asegurar la obtención de la capacidad de soporte o la resistencia especificada a lo largo de toda la obra y evitar problemas posteriores, en general muy costosos de solucionar.

La dosificación óptima de cemento se determina ensayando varias series de probetas con distintas dotaciones de cemento. Dichas probetas se fabrican con la humedad óptima y la densidad mínima exigida en obra. Se debe adoptar un cierto margen de seguridad para tener en cuenta la variabilidad de la obra. Una vez definido el contenido de cemento conviene realizar un análisis de sensibilidad sobre probetas compactadas a diferentes densidades. De esta forma se puede determinar la dotación de conglomerante a añadir al suelo que garantice suficientemente la obtención de las prescripciones exigidas (CBR o resistencia) con las densidades alcanzadas en obra.

2.6.2.2 ETAPAS DE LA EJECUCIÓN

La estabilización de un suelo puede realizarse “in situ” o en central. Este último proceso es similar al de otras unidades de obra como el suelocemento, pero es poco frecuente.

Las operaciones a realizar en la estabilización “in situ” son en general las siguientes:

- Preparación del suelo al menos en tres aspectos básicos: granulometría (escarificado, disgregación y retirada de gruesos), humedad (humectación o secado) y nivelación
- Distribución del conglomerante: según como se realice, se diferencia entre estabilizado por vía seca (el cemento se extiende en polvo sobre la superficie de la capa a estabilizar) o por vía húmeda (se incorpora como lechada al suelo dentro de la estabilizadora)
- Mezclado: un adecuado proceso de mezclado, con la humedad apropiada para asegurar una buena homogeneidad del suelo estabilizado en todo el espesor requerido, es muy importante para lograr un aprovechamiento óptimo de esta unidad

- Compactación inicial: tras el mezclado se realizan varios ciclos de compactación con el rodillo vibrando a su máxima amplitud para compactar bien el fondo de la capa
- Refino o nivelación: posteriormente se lleva a cabo un refino con la motoniveladora para obtener la rasante
- Compactación final: se realiza con un rodillo liso, que a veces se combina con un rodillo de neumáticos para cerrar la superficie, hasta obtener como mínimo la densidad especificada. Tanto en esta etapa como en la compactación inicial es importante mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo por lo monótono que resulta y controlar a menudo que el proceso se realiza correctamente
- Curado y/o protección superficial: El curado se puede realizar manteniendo la superficie húmeda mediante un riego con agua pulverizada, o bien extendiendo una emulsión bituminosa de rotura rápida y baja viscosidad con una dotación mayor de 300 gr/m² de betún residual. Para poder soportar el paso inmediato de los vehículos sin que se produzcan deformaciones importantes que puedan perjudicar su comportamiento posterior, el suelo estabilizado con cemento debe tener un esqueleto mineral con estabilidad suficiente

De acuerdo con los equipos disponibles, algunas de las operaciones anteriores pueden agruparse o realizarse conjuntamente.

2.6.2.3 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

El término suelo-cemento se ha definido desde diversos puntos de vista. Las modificaciones realizadas en el material de partida, el contenido de

cemento y el tipo de suelo han generado distintas definiciones y clasificaciones.

Las más reconocidas son:

- a. Suelo-Cemento: Se define al suelo-cemento como un material elaborado a partir de una mezcla de suelos finos y/o granulares, cemento y agua, la cual se compacta y se cura para formar un material endurecido con propiedades mecánicas específicas. El contenido de cemento en peso suele ser del orden del 3% al 15% en peso de materiales secos y a largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 4 MPa. El contenido de agua se elige para obtener mezclas de consistencia seca que permitan su compactación con rodillo. El suelo-cemento se usa normalmente como capa de apoyo de otros materiales tratados con cemento o de concreto hidráulico o bien como capa resistente, bajo capas bituminosas. Puede fabricarse en planta central, o bien ejecutarse "in situ"

- b. Suelo mejorado o modificado con cemento: Se usa en sub-rasantes o explanadas y se define como una mezcla de suelo y una cantidad pequeña de cemento, generalmente inferior al 2% en peso, añadida con el fin de mejorar algunas propiedades de los suelos. Al contrario que el suelo-cemento, la mezcla resultante sigue teniendo la estructura de un material suelto, al menos a corto plazo. La mejora o modificación con cemento se usa generalmente con suelos de grano fino, plásticos y a veces con humedades naturales excesivas con dificultades de compactación, expansividad y baja capacidad de soporte. El conglomerante modifica sus características a corto y largo plazo de forma moderada, pasando a ser suelos utilizables. Por su limitada o nula resistencia mecánica se recomienda su uso en sub-rasantes de pavimentos de tráfico ligeros y medios. Para el caso de tráfico pesado y de alto volumen, se sugiere colocar una sub-rasante de

mayor capacidad de soporte sobre el suelo modificado con cemento.

- c. Suelo estabilizado con cemento: Se usa también en sub-rasantes o explanadas, especialmente en estructuras de pavimentos para tráficos pesados. Es una mezcla de suelo, cemento y agua, con un contenido mínimo de conglomerante en peso del 2%, a fin de obtener un material dotado de una cierta rigidez y resistencia mecánica.
- d. Base granular tratada con cemento: La Portland Cement Association (PCA) la define como una mezcla de agregados pétreos, cemento Portland y agua, que endurece después de ser compactada y curada para formar un material de pavimento durable. Se usa como capa de base en estructuras de pavimentos, siendo necesaria una capa de rodadura bituminosa o de concreto hidráulico. Las propiedades estructurales de bases granulares tratadas con cemento dependen de los agregados, del contenido de cemento, de las condiciones de compactación y curado, y de la edad. Son usuales valores de resistencia a la compresión de 3 a 6 MPa.

2.6.2.4 EFECTOS A MEDIO Y LARGO PLAZO

Resultan del fraguado y endurecimiento del conglomerante, los cuales proporcionan a los suelos tratados una resistencia mecánica que puede ser predominante en su comportamiento. El valor de esta resistencia varía ampliamente y es función, principalmente, del tipo de conglomerante y de la dosificación del mismo.

Una vez completado el fraguado, hay un periodo durante el cual continúan creciendo las resistencias mecánicas. En climas templados su duración

puede variar, siempre dependiendo de la naturaleza de los conglomerantes, entre algunas semanas y varios meses.

Los efectos a largo plazo de la incorporación del cemento son diferentes según se trate de suelos granulares o de suelos finos.

En los suelos finos (arcillosos y limosos con plasticidad no elevada), la hidratación del cemento crea unos enlaces resistentes entre las partículas, formando una matriz que envuelve a las mismas. Esta matriz tiene una estructura de panal de la cual depende la resistencia de la mezcla, puesto que las aglomeraciones de partículas dentro de las "celdas" tienen una resistencia muy reducida y contribuyen muy poco a la del conjunto. La matriz fija las partículas, de forma que ya no pueden deslizar las unas sobre las otras. Es decir, el cemento reduce la plasticidad y aumenta la resistencia a esfuerzos cortantes. El efecto químico de superficie del cemento reduce la afinidad por el agua y con ello la capacidad de retención de la misma de los suelos arcillosos. Debido a esta menor afinidad por el agua y a la resistencia de la matriz, los cambios de volumen (hinchamientos) provocados por la absorción de agua y los efectos de la congelación y el deshielo disminuyen notablemente.

2.6.2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA MEZCLA DE SUELO + CEMENTO

- a. Ejecución en época calurosa: Las altas temperaturas pueden dar lugar a una desecación del material que altera desfavorablemente las relaciones de hidratación del cemento.

Algunas de las medidas que se pueden emplear para reducir estos problemas cuando se extiende a temperaturas superiores a 35 °C son:

- Empleo de un retardador de fraguado para incrementar el plazo de trabajabilidad, que en estos casos disminuye.

- mezclado con agua fría, incrementando el volumen de agua para prever la evaporación que se producirá durante el proceso.
 - Pulverización de agua durante la compactación.
 - Extensión del riego de curado inmediatamente.
- b. Ejecución en época fría: No se debe extender el material cuando la temperatura ambiente descienda por debajo de 5°C y exista fundado temor de heladas, ya que la ganancia de resistencia es muy débil y prácticamente inexistente por debajo de dicha temperatura. En caso de que la temperatura tienda a aumentar, se puede fijar este límite en 2°C.

En este caso se deberán emplear cementos con un contenido reducido de adiciones (tipo II) y obtener altas resistencias. Por otra parte, en caso de ser factibles recomendable realizar la mezcla con agua caliente.

- c. Ejecución en tiempo lluvioso: En caso de lluvia la ejecución de la estabilización debe suspenderse, tanto por la gran dificultad para compactar el material al incrementarse considerablemente la humedad por encima de la óptima, como por el peligro de que se produzca un lavado de la superficie. No obstante, se puede trabajar cuando haya una lluvia fina y ligera, que tienda a desaparecer.
- d. Ejecución con viento fuerte: En caso de dosificarse el cemento en polvo, no se debe extender cuando haya viento fuerte (velocidad por encima de 35 Km/h). Si el cemento se incorpora como lechada, hay que tener en cuenta que, incluso aunque se esté en un ambiente marítimo con un alto porcentaje de humedad, la

capacidad del viento para desecar rápidamente la superficie del material es muy alta, por lo que se deberán tomar las precauciones adecuadas.

- e. Componentes del suelo: La reacción favorable suelo-cemento se ve impedida cuando el primero contiene materia orgánica, pues los ácidos orgánicos poseen gran afección 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 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 ávidas de agua, pues privan a los aglomerantes de la humedad necesaria para su función.

2.6.2.6 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS SUELO – CEMENTO

La dosificación de un suelo estabilizado con cemento para una explanada tiene como objetivo obtener la combinación óptima de cemento, suelo, agua, y en su caso, aditivos, que cumpla las especificaciones técnicas fijadas sobre sus características en estado fresco y endurecido. La dosificación debe tener en cuenta además las condiciones de ejecución, especialmente la trabajabilidad, la calidad pretendida y la economía de la obra.

2.6.2.7 PROPIEDADES DE LA MEZCLA SUELO – CEMENTO

Las propiedades fundamentales que se buscan en los suelos estabilizados

con cemento son:

- Una capacidad de soporte adecuada, evaluada a través del ensayo de compresión
- Una resistencia mecánica correcta, en el caso de los suelos estabilizados
- En todos los casos, una durabilidad suficiente: estabilidad química y volumétrica, y resistencia a la meteorización

Estas propiedades se deben mantener para pequeñas variaciones de los componentes. Además, la mezcla debe ser trabajable durante un tiempo suficiente y fácilmente compactable. Junto a estas características se pueden perseguir otras, como la de permitir una circulación inmediata, que dependerán de las condiciones propias de la obra.

2.6.2.8 FASES DE LA DOSIFICACIÓN

La dosificación de los suelos estabilizados con cemento comprende varias fases:

- Definición y caracterización de los materiales que componen el suelo estabilizado con cemento
- Determinación en laboratorio de la fórmula de trabajo con las proporciones de los distintos materiales
- Comprobación y ajuste de la fórmula de trabajo en obra

Determinaciones previas

Previamente a la dosificación, se debe comprobar que los materiales que se van a utilizar cumplen las especificaciones de los Pliegos de Prescripciones Técnicas aplicables a la obra.

En lo que se refiere al cemento, y salvo que éste se encuentre en posesión de un Sello o Marca de Calidad oficialmente reconocidos, se deben realizar los ensayos dispuestos en la vigente Instrucción para la recepción de cementos o normativa que la sustituya.

Dosificación

El procedimiento de dosificación consta de las siguientes fases:

- Determinación del contenido óptimo de agua
- Dosificación del conglomerante

a. Determinación de contenido óptimo del agua

En los suelos estabilizados con cemento el agua tiene dos misiones fundamentales:

- Hidratar el cemento.
- Facilitar la compactación de la mezcla.

Para la primera de ellas se necesita únicamente una pequeña cantidad de agua, del orden del 2%, por lo que la humedad de la mezcla viene siempre determinada por la necesaria para la compactación. El objetivo de esta fase de la dosificación es, por tanto, hallar el contenido óptimo de agua para la compactación de una mezcla cuya dotación de cemento se

ha estimado aproximadamente para que se obtenga con la misma el índice CBR o la resistencia especificada. Como porcentaje de cemento de partida, en el caso de exigirse únicamente un determinado CBR, se adoptará el valor mínimo del 2% – 3%; mientras que a efectos de conseguir resistencias mecánicas se pueden adoptar los indicados en la Tabla N° 5

MATERIAL	% DE CEMENTO INICIAL
Suelos granulares	3
Suelos finos cohesivos	5

Tabla N° 5. Porcentajes iniciales de cemento

Como el contenido final de cemento, definido por los ensayos de CBR o de compresión, será probablemente distinto al estimado en la determinación inicial del contenido óptimo de agua, habría que realizar un nuevo ensayo de compactación al final del proceso y una comprobación del índice CBR o de la resistencia. Hay que mencionar a este respecto que, a igualdad del resto de factores, una variación en algún punto porcentual del contenido de cemento tiene una influencia muy limitada en el valor de la humedad óptima. En consecuencia, no se considera necesario en general repetir posteriormente el ensayo de compactación.

Generalmente el porcentaje de agua de compactación que se fija en la fórmula de trabajo es el que corresponde a la humedad óptima retenida en el ensayo Proctor modificado. No obstante, algunos técnicos prefieren reducir ligeramente (en general medio punto) el contenido de agua respecto a dicho óptimo teniendo en cuenta dos consideraciones:

- Las resistencias máximas se suelen obtener para contenidos de humedad entre medio punto y un punto porcentual (-0,5 % y -1 %) inferiores al del óptimo Proctor modificado

- Si se selecciona el contenido óptimo, las tolerancias de los Pliegos de Prescripciones pueden llevar a que se fabriquen materiales con contenidos de agua en el lado húmedo de la curva Proctor, lo que puede producir caídas de resistencia

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la fabricación de suelos estabilizados con cemento en el lado seco, siguiendo el criterio señalado, va en perjuicio de la trabajabilidad del material, por lo que lo más adecuado es que la decisión final sobre el contenido de agua se base en un estudio de la sensibilidad al mismo, no sólo de la densidad y resistencia, sino también de la trabajabilidad y en los resultados obtenidos en el tramo de ensayo. En caso de que se utilicen retardadores de fraguado, generalmente se puede fijar un contenido de agua ligeramente por debajo del óptimo sin problemas de trabajabilidad.

b. Dosificación del conglomerante

Una vez definida la humedad óptima de compactación, la dosificación del conglomerante se obtiene por medio de ensayos de resistencia a compresión.

Esta fase tiene a su vez varias etapas:

- Fabricación y curado de las probetas.
- Realización de los ensayos de resistencia a compresión a la edad especificada.
- Primer tanteo del contenido de conglomerante.
- Comprobación de la sensibilidad de la dosificación.
- Ajuste final del contenido de conglomerante.

2.6.2.9 FABRICACIÓN Y CURADO DE LAS PROBETAS

La resistencia a compresión, se debe determinar sobre series de probetas (tres como mínimo por cada dotación de cemento elegida) fabricadas y compactadas en laboratorio con el contenido óptimo de agua de compactación y la densidad mínima exigida en obra. Es muy importante que en los ensayos de laboratorio las muestras se compacten con la misma densidad exigida en obra.

El curado de las probetas se lleva a cabo preferentemente en cámara húmedo o, si no fuera posible, mediante otros procedimientos tales como su introducción en una bolsa plástica sellada. Si se realizan en cámara húmeda se suelen introducir las probetas el primer día con el molde de fabricación, y después de 24h se retiran del molde prosiguiendo el curado hasta la fecha fijada.

2.6.2.10 SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO

Una vez realizados los ensayos de compresión a la edad especificada, se representan en un gráfico los valores del mismo en función del contenido de cemento. Se elegirá este último teniendo en cuenta que:

- Debe superar un porcentaje del 2%, para garantizar un reparto adecuado del cemento en la masa de la mezcla
- Debe permitir obtener el valor de resistencia especificado, con la densidad de referencia exigida realmente en obra
- Para tener en cuenta las dispersiones de los equipos de obra se recomienda incrementar en medio punto porcentual el valor obtenido en laboratorio

Es recomendable escoger un contenido de cemento que proporcione una resistencia algo superior a la mínima especificada (entre 15% y 20%) para tener en cuenta las caídas de resistencia que se pudieran dar en obra a causa de las tolerancias: menor contenido de cemento, mayor humedad de compactación, etc. Este factor corrector se puede ajustar posteriormente a la vista de la sensibilidad del material frente a los cambios en la dosificación.

2.6.2.11 FÓRMULA DE TRABAJO

Una vez realizados en laboratorio los ensayos anteriores se define la fórmula de trabajo, la cual debe incluir los siguientes aspectos:

- La dosificación mínima de conglomerante, indicando su tipo y clase resistente referida a la masa total de suelo seco y, en su caso, por metro cuadrado (m²) de superficie
- El contenido de humedad del suelo inmediatamente antes de su mezcla con el cemento, y el de la mezcla en el momento de su compactación
- La compacidad a obtener, mediante el valor mínimo de la densidad
- En su caso, el contenido de retardador de fraguado

Es deseable, por otro lado, que el responsable técnico de la obra disponga del estudio de laboratorio o, al menos, de la siguiente información:

- Origen de los materiales ensayados.
- Características de los materiales.

- El valor de resistencia a compresión simple a los 7 días, según el tipo de suelo estabilizado.
- El plazo de trabajabilidad.
- Las curvas de la dosificación en laboratorio (Proctor modificado e índice CBR o resistencia a compresión, dependiendo del tipo de suelo estabilizado).

2.6.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

La estabilización de suelos con emulsiones asfálticas tiene una amplia aplicación en distintas tareas de la construcción vial. El objetivo del estabilizado de caminos es presentar una técnica constructiva de bajo costo y con buenas condiciones de servicio para mejorar la red vial en caminos y calles no pavimentadas. Parte importante del bajo costo de esta técnica es que se utiliza el suelo del lugar. Es decir no es necesario proveerse de suelos seleccionados.

La técnica es posible de efectuarse con el equipamiento presente en la mayoría de los municipios del país. Además, no se necesita personal altamente especializado con lo cual se transforma un una importante fuente de trabajo en la zona de la obra.

Los productos utilizados en la estabilización de suelos son variados tanto asfálticos como no asfálticos. Hay varios factores a favor del uso de las emulsiones asfálticas, frente a otros productos asfálticos:

- Dado que las emulsiones se trabajan a temperatura ambiente, no requieren calentamiento para su manipulación ni para su empleo en obra disminuyendo así los riesgos de quemaduras en los operarios

- Además, como el medio dispersante es agua las emulsiones no son inflamables ni emanan vapores de hidrocarburo hacia la atmósfera
- El objetivo del estabilizado es otorgarle al suelo resistencia mecánica y que ésta resistencia permanezca con el tiempo.
- El estabilizado del suelo con emulsión asfáltica se puede realizar con o sin el agregado de otros materiales.

La emulsión asfáltica catiónica utilizado para la estabilización de la vía, proviene de la composición de tres elementos básicos: asfalto, agua y un agente emulsificante. El asfalto es el componente base de la emulsión y constituye entre un 60% y 75%. El poder cementante del asfalto como componente de la emulsión conlleva a que fije a los agregados en posiciones adecuadas para transmitir las cargas aplicadas a las capas inferiores.

Una emulsión asfáltica es una dispersión de micro partículas de cemento asfáltico en una matriz acuosa estabilizada. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa).

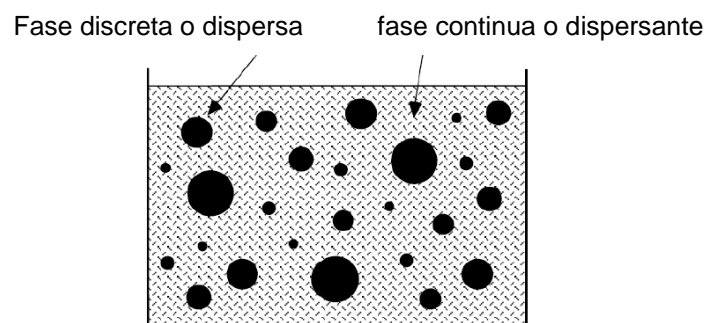


Gráfico N° 11. Diagrama esquemático de una emulsión. Instituto Mexicano del Transporte

Mediante ensayos de laboratorio se debe establecer el diseño de la mezcla suelo – emulsión indicando la proporción que se vayan a usar.

2.6.3.1 DISEÑO DE UN ESTABILIZADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

En un estabilizado suelo-emulsión cada componente cumple una determinada función. El suelo aporta cohesión a la mezcla, por eso es importante controlar los valores de plasticidad. El asfalto, proveniente de la emulsión asfáltica, es el que hace la mezcla insensible al agua.

Mediante ensayos de laboratorio no solo es posible dosificar correctamente un estabilizado de suelos sino también predecir sus características una vez realizado.

Materiales

Los suelos que se usen para la construcción del suelo-emulsión, pueden ser del propio camino o provenir, en todo o en parte, de préstamos seleccionados.

Además debe presentar las siguientes características:

- Los suelos deben estar limpios y no deben tener más de 1% de su peso de materia orgánica
- El índice de plasticidad del suelo debe ser menor o igual a 9%. El espesor total de la capa de suelo estabilizado con emulsión, será como mínimo de 15 cm
- La gradación será definida en las especificaciones técnicas del Proyecto

2.6.3.2 DOSIFICACIÓN DE SUELO – EMULSIÓN

Es la secuencia de ensayos realizados con una determinada mezcla de suelo y emulsión, seguida de la interpretación de los resultados por medio de criterios preestablecidos; el resultado final es la fijación de la variable citada, el objetivo de dosificación pasa a ser sólo la fijación de cantidad adecuada de emulsión.

La dosificación se la hace experimentalmente: diferentes cantidades de emulsión son usadas en los ensayos y el análisis de resultados indica el porcentaje de emulsión que nos da mejor resultados al estabilizar el suelo sobre el concepto del suelo – emulsión.

2.6.3.3 PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LA ESTABILIZACIÓN

Son ensayadas tres briquetas por cada porcentaje, diferenciando la cantidad emulsión mediante dos puntos porcentuales.

La determinación de la adecuada cantidad de emulsión se basa en el hecho de que suelos mezclados con pequeñas cantidades de emulsión, estando debidamente compactados y curados, mejoran sensiblemente sus características originales de resistencia mecánica.

La acción de las cargas y la variación de condiciones climáticas podrían, después de cierto tiempo, disgregar la mezcla endurecida, lo que haría que perdiese el grado de estabilización alcanzado, transformándose en una simple mezcla compactada de suelo con emulsión, de calidad baja e indefinida.

2.6.3.4 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS

Las briquetas son las probetas de ensayo de las posibles mezclas suelo – emulsión, son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de emulsión. El margen de contenidos de emulsión

usado en las briquetas de ensayo esta determinado con base en experiencia previa con el suelo de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final.

Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son extraídas de los moldes.

Altura = 3"

Diámetro = 4"



Gráfico N° 12. Molde metálico para compactar briquetas

La ejecución de la mezcla no deberá iniciarse hasta que se haya estudiado y aprobado su correspondiente fórmula de trabajo.

Dicha fórmula señalará:

- El tanto por ciento (%), en peso, de emulsión sobre el peso del suelo seco
- El tanto por ciento de agua que debe contener el suelo en el momento del mezclado
- El valor mínimo de la densidad a obtener

Se admitirá una tolerancia en la dosificación de emulsión, respecto de la prescrita en la fórmula de trabajo, de un uno por ciento (± 1 %) del peso seco del material a estabilizar.

2.6.3.5 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE EXISTENTE

Cuando se emplee el procedimiento de mezcla "in situ" en varias pasadas, utilizando el propio suelo de la explanada, deberá escarificarse dicho suelo en todo el ancho de la capa que se va a mezclar, hasta una profundidad suficiente para estabilizar.

Si se añade suelo de aportación para corregir el existente, se mezclarán uniformemente ambos suelos, en todo el espesor de la capa a estabilizar, antes de iniciar la aplicación de ligante.

En el caso de emplear el procedimiento de mezcla "in situ", ejecutado en una sola pasada, no será necesario la previa escarificación ni el mezclado del suelo de aportación. Si el terreno a estabilizar es el de la explanación, se nivelará ésta a las cotas previstas. Si hay terreno de aportación, se extenderá éste sobre la explanada nivelada, con el espesor uniforme previsto.

Si todo el suelo empleado es de aportación, o la mezcla se realiza en central, se comprobará, antes de extenderlo, que la superficie existente tiene la densidad exigida y las rasantes indicadas.

2.6.3.6 MÉTODO DE MEZCLA "in situ"

Para la mezcla "in situ" se describen los siguientes pasos:

- a. Disgregación del suelo: El suelo que vaya a ser estabilizado se disgregará previamente, en el caso de algunos suelos difíciles de pulverizar en su estado natural, se puede facilitar la operación por una humectación previa.

- b. Humedad del suelo: Inmediatamente antes de realizar la mezcla, el contenido de agua del suelo disgregado deberá ser tal, que permita un mezclado uniforme e íntimo con la emulsión, mediante el equipo que se utilice. Si hubiera que aumentar la humedad, se añadirá agua al suelo antes de su mezcla.
- c. Aplicación de la emulsión: Antes de aplicar la emulsión, deberá perfilarse la superficie del suelo, disgregado y con la humedad debida, para que tenga aproximadamente la sección definitiva que indiquen los Planos, o bien, si el equipo mezclador que se utiliza así lo requiere, deberá formarse un camellón de sección y densidad uniforme.

Seguidamente se aplicará el producto bituminoso, con la dotación óptima, de manera uniforme.

La velocidad del equipo deberá regularse convenientemente para conseguir la mayor eficacia, y las operaciones de mezclado se reiterarán hasta obtener un material homogéneo y exento de concentraciones de ligante.

Si la mezcla se realiza por medio de niveladoras o gradas de discos y el espesor señalado en los Planos excede de quince centímetros (15 cm), deberán fraccionarse las operaciones de mezcla en dos (2) o más tongadas, de espesor inferior a la antedicha limitación.

- d. Extensión y compactación de la mezcla: Para comenzar la operación de compactación es necesario que la mezcla tenga la humedad óptima de compactación.

Una vez alcanzada esta humedad óptima y extendida la mezcla uniformemente con el espesor previsto, se comenzará

inmediatamente la compactación de la capa, prosiguiéndose hasta alcanzar una densidad igual, como mínimo, a la que corresponda al noventa y cinco por ciento (95%) de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado.

Con independencia del tipo de compactadores empleados y para quitar las huellas de los rodillos y niveladoras, la compactación final deberá hacerse con apisonadoras de neumáticos.

- e. Tramos de prueba: Al iniciarse los trabajos, se construirá secciones de ensayo, del ancho y longitud adecuados.

Se tomarán muestras del suelo estabilizado y se ensayarán para determinar su conformidad con las condiciones especificadas sobre grado de disgregación del suelo, humedad, espesor de la capa, densidad, proporción de ligante bituminoso y demás requisitos exigidos.

En el caso de que los ensayos indicasen que el material estabilizado no se ajusta a dichas condiciones, deberán hacerse inmediatamente las necesarias correcciones y, si fuera preciso, se modificará la fórmula de trabajo.

2.6.3.7 LIMITACIONES DE LA EJECUCIÓN

El material estabilizado que no haya sido compactado al final de la jornada se recogerá en un camellón, para extenderlo y compactarlo al día siguiente. Asimismo se recogerá en un camellón cuando llueva, y éste no se extenderá hasta que su superficie esté seca.

Se prohibirá la acción de todo tipo de tráfico sobre las capas recién ejecutadas, hasta que no se haya completado su compactación. Si ello no es factible, el tráfico que necesariamente tenga que pasar sobre ellas se distribuirá de forma que no se concentren huellas de rodadas en la superficie.

La respuesta y duración de la estabilización suelo-emulsión estará sujeta a los siguientes factores:

- Dureza, gradación del suelo y tipo y calidad de emulsión
- Afinidad del suelo con la emulsión
- Calidad del drenaje existente
- Calidad de la ejecución de manera que se respeten las dosificaciones materiales, tipo y composición de la mezcla y utilización de equipos de acuerdo a las condiciones del Proyecto.

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE ESTUDIO

Lo primero que hay que consignar en la obtención de una muestra es que ésta sea representativa del suelo a estudiar. Un muestreo adecuado y representativo es de primordial importancia, pues tiene el mismo valor que el de los ensayos en sí. A menos que la muestra obtenida sea verdaderamente representativa de los materiales que se pretende usar, cualquier análisis de la muestra solo será aplicable a la propia muestra y no al material del cual procede, de ahí la necesidad de que el muestreo sea efectuado por personal conocedor de su trabajo.



Fotografía N° 1. Sitio de extracción de las muestras. Autor

Una vez identificado el sitio de donde se obtendrán las muestras para los ensayos pertinentes, es necesario desechar la capa superficial de suelo, empezando por su vegetación.



Fotografía N° 2. Calicata. Autor

Para el análisis correspondiente del suelo llegamos a nivel natural de sub-rasante y tomamos las muestras.



Fotografía N° 3. Extracción del suelo. Autor

3.2 ENSAYOS DE CAMPO

3.2.1 ENSAYO CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN (DCP)

La determinación del Valor de Soporte California, CBR, parámetro aplicado en el diseño de pavimentos flexibles, en general es considerada como un proceso complejo que adicionalmente requiere de bastante tiempo para su obtención.

Como respuesta a estas dificultades surgen diferentes dispositivos como el DCP (Cono Dinámico de Penetración) que facilitan y proporcionan mayor practicidad a los ensayos convencionales.

3.2.2 ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS DEL DCP

El DCP de 8Kg. se muestra en forma esquemática en el Gráfico N° 13 consiste de los siguientes componentes: una barra de acero de 15.8 mm (5/8") de diámetro, con una punta – cono recambiable o desechable, un mazo de 8 Kg. (17,6 lbs.) el cual es soltado de una altura de 575 mm (22,6"), un ensamblaje de acople y un mango. La punta-cono tiene un ángulo de 60° y un diámetro en la base de 20 mm (0,79").

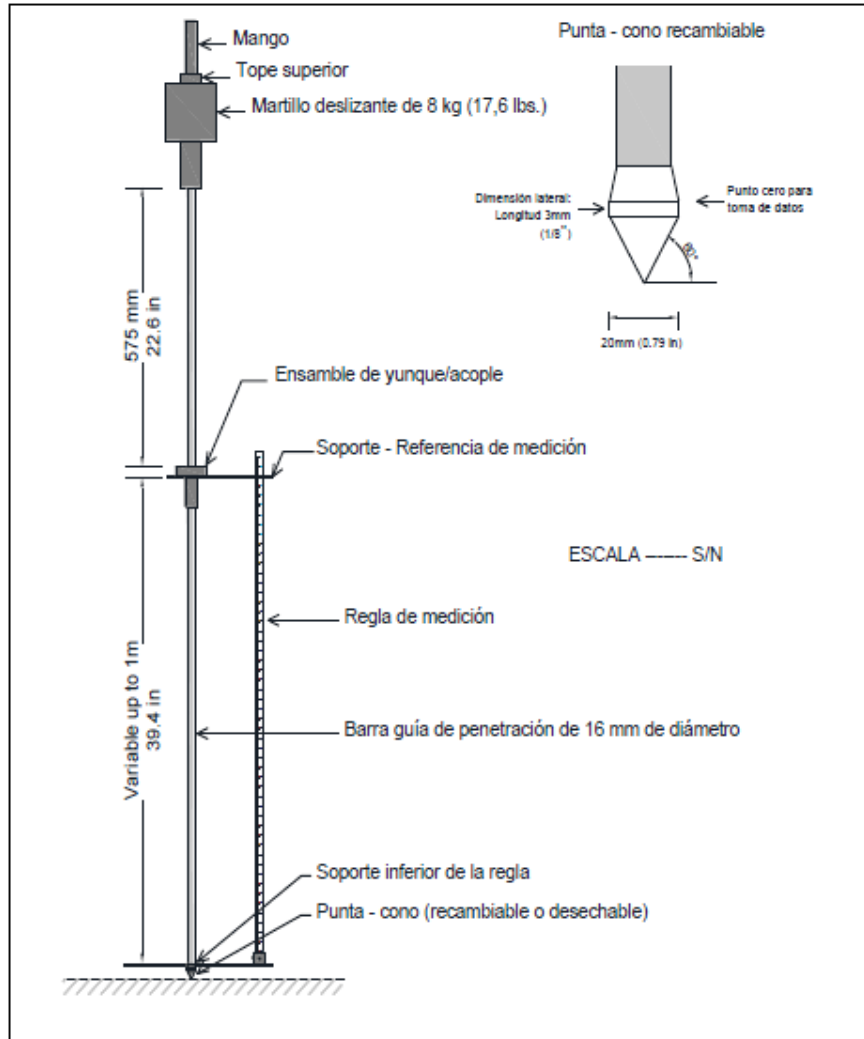


Gráfico N° 13. Esquema del cono dinámico de penetración. ASTM 6951-03

La interpretación de los resultados se realiza analizando: la curva DCP, el Índice de Penetración o Número DN, y el Diagrama estructural.

3.2.3 CURVA DCP

Gráfica que representa la penetración acumulada en función del número de golpes acumulados para los respectivos datos. En este tipo de curvas, como se muestra en el Gráfico N° 14 se puede visibilizar el número de capas existentes representadas por rectas de diferentes pendientes, también se puede determinar el espesor de dichas capas.

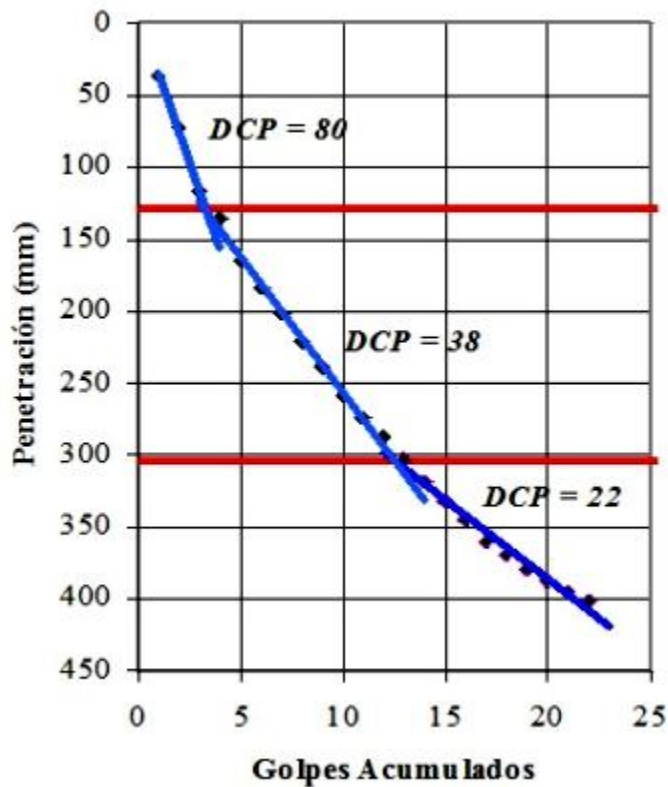


Gráfico N° 14. Curva DCP para una serie de valores, se observan tres capas diferentes

Manual de pavimentos Ing. Milton Torres E.P.N

3.2.4 EQUIPO Y MATERIALES.

- Para este ensayo se utilizó el DCP de 8Kg.

3.2.5 PROCEDIMIENTO:

1. Comprobación del equipo. Se inspecciona el equipo DCP para identificar partes dañadas por el uso, en particular el acople y la empuñadura, un desgaste excesivo de la barra o la punta-cono recambiable. Todas las uniones deben estar bien ajustadas, incluyendo el ensamble de acople entre la punta-cono recambiable y la barra.

2. Operación básica. El operador sostiene el aparato por la empuñadura en posición vertical o a plomo, y levanta y suelta el mazo desde la altura estándar. Según la escala que se utilice se mide y toma nota de la penetración total para un número establecido de golpes o la penetración para cada golpe.

3. Lectura inicial: El DCP se sostiene verticalmente y la punta se coloca de tal forma que la parte superior más ancha de la punta está a nivel de la superficie del material a probar. Se obtiene una lectura inicial de la escala vertical graduada o una escala separada. La distancia es medida con precisión lo más cerca a 1 mm (0,04”).

4. Continuidad del ensayo:
 - a. Dejando caer el mazo. Se sostiene el DCP en una posición vertical o a plomo. El operador levanta el mazo hasta que solamente haga un ligero contacto con el mango. El mazo no debe hacer impacto sobre el mango cuando es levantado. Luego se suelta el mazo en caída libre y se deja que impacte sobre el ensamble de yunque. La cantidad de impactos y la penetración correspondiente son registradas.

 - b. Profundidad de la penetración. La profundidad de la penetración variará según su aplicabilidad.

 - c. Impedimento del equipo DCP. La presencia de agregados de gran tamaño o estratos de roca va a ocasionar que la penetración se imposibilite o que se flexione la barra guía. Si después de 5 impactos, el DCP no ha avanzado más de 2 mm (0,08”) o el mango se ha desviado más de 75 mm (3 “) de la posición vertical, se debe detener la prueba y mover el DCP hacia otro lugar donde realizarla. La nueva ubicación para la

realización de la prueba debe estar ubicada con lo mínimo a unos 300 mm (12 ") de la localización anterior, con el fin de minimizar el margen de error en la prueba ocasionado por problemas del material.

- d. Extracción. Luego de completar la prueba, el DCP es extraído golpeando el mazo hacia arriba contra la empuñadura.

5. Registro de datos:

- a. Se registra datos de cantidad de golpes y penetración acumulada en mm. Si se puede obtener una medida acerca de la cantidad de humedad, se registra.

La cantidad de impactos entre las lecturas puede variarse, dependiendo de la resistencia del material. Generalmente, las lecturas se toman luego de un número predeterminado de golpes, a saber; luego de un impacto en el caso de materiales suaves, 5 impactos en el caso de materiales —normales y 10 impactos en el caso de materiales muy resistentes. La penetración correspondiente a un número determinado de golpes se registra al 1 mm más cercano (0,04"). También se debe realizar una lectura tan pronto cambien significativamente las propiedades del material o la razón de penetración

3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

En todo proyecto de ingeniería que tenga que ver con el suelo como material estructural o como material de construcción, es necesario para su óptimo desarrollo el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

La investigación de estas propiedades se realiza mediante los ensayos de laboratorio pertinentes que han sido diseñadas con este objetivo fundamental y que se desarrollan en el laboratorio de mecánica de suelos y también en el campo.

El estudio de estas propiedades físicas y mecánicas del suelo es primordial para determinar los parámetros del suelo relacionados con su resistencia, su deformabilidad y sus características hidráulica y fin de detener un conocimiento razonablemente preciso para predecir su comportamiento estructural en las obras de ingeniería geotécnica

3.3.1 LÍMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación SUCS.

Fueron originalmente ideados por un sueco de nombre Atterberg especialista en agronomía y posteriormente redefinidos por Casagrande para fines de mecánica de suelos de la manera que hoy se conocen.

Para obtener estos límites se requiere remodelar (manipular) la muestra de suelo destruyendo su estructura original y por ello es que una descripción del suelo en sus condiciones naturales es absolutamente necesaria y complementaria.

Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con todo el material menor que la malla N°40 (0.42 mm). Esto quiere decir que no solo se trabaja con la parte fina del suelo (< malla N°200), sino que se incluye igualmente la fracción de arena fina.

Una de las propiedades más importante de los suelos finos cohesivos es la plasticidad; la cual se define como la propiedad que presentan esos suelos de poderse deformar hasta cierto límite sin romperse.

Esta propiedad y otra igualmente importante son modificadas por el contenido de agua, pues esta cambia la fuerza de interacción entre partículas y por ende el comportamiento del suelo.

A las arcillas, y a los suelos de grano finos afines, se le puede dar consistencia semilíquida mezclándolos con agua.

Cuando este contenido de humedad se reduce por evaporación y volvemos a mezclar la muestra, obtenemos un material plástico o como masilla. Si el contenido de humedad se reduce más, el material se hace semisólido y se rompe o se deforma. El campo dentro del cual el suelo tiene consistencia plástica se llama estado plástico.

Definiciones

- a. Contenido de humedad (w): Razón entre peso del agua y peso del suelo seco de una muestra. Se expresa en porcentaje:
- b. Límite Líquido (w_L ó LL): contenido de humedad del suelo en el límite entre el estado semi-líquido y plástico.
- c. Límite Plástico (w_p ó LP): es el contenido de humedad del suelo en el límite entre los estados semi-sólido y plástico.
- d. Índice de Plasticidad (IP): es la diferencia entre los límites líquido y plástico, es decir, el rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene plástico.

3.3.1.1 EQUIPO

- Casuela de Casagrande calibrada
- Ranurador
- Balanza con aproximación de 0.1 gr.
- Horno
- Tamiz N°40

- Espátulas
- Placa de vidrio
- Agua
- Recipientes para las muestras



Fotografía N° 4. Equipo de Casagrande. Autor

3.3.1.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Se utiliza únicamente la parte del suelo que pasa por la malla N° 40 (0.42 mm). Se procede a agregar o retirar agua según sea necesario y revolver la muestra hasta obtener una pasta semi-líquida homogénea en términos de humedad.

Para los limos y suelos arenosos con poco contenido de arcilla el ensayo se podrá realizar inmediatamente después de agregar agua, siguiendo el procedimiento indicado en letra b. Para los limos arcillosos será necesario conservar la pasta aproximadamente 4 horas en un recipiente cubierto. Para las arcillas este tiempo deberá aumentarse a 15 o más horas para asegurar una humedad uniforme de la muestra.

3.3.1.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL).

En la práctica, el límite líquido se determina sabiendo que el suelo remoldeado a $w = LL$ tiene una pequeña resistencia al corte (aprox. 0.02 Kg/cm^2) de tal modo que la muestra de suelo remoldeado necesita de 25

golpes para cerrar en $\frac{1}{2}$ " dos secciones de una pasta de suelo de dimensiones especificadas más adelante.

1. Se deberá iniciar el ensayo preparando una pasta de suelo en la cápsula de porcelana con una humedad ligeramente superior al límite líquido, para lo cual recibirán indicaciones del instructor,



Fotografía N° 5. Hidratación de la muestra. Autor

2. Desmontar y secar la cápsula de la máquina de Casagrande, asegurándose que ella se encuentre perfectamente limpia y seca antes de iniciar el procedimiento,
3. Montar la cápsula en su posición para el ensayo,
4. Colocar entre 50 y 70 g de suelo húmedo en la cápsula, alisando la superficie a una altura de 1 cm con la espátula, cuidando de no dejar burbujas de aire en la masa de suelo,



Fotografía N° 6. Porción de suelo en la cápsula de Casagrande. Autor

5. Usando el acanalador separar el suelo en dos mitades según el eje de simetría de la cápsula; para una arcilla, el surco se puede hacer de una vez; los limos pueden exigir 2 o 3 pasadas suaves antes de completarlo, siendo este procedimiento aún más complejo cuando se trata de suelos orgánicos con raicillas,
6. Girar la manivela de manera uniforme a una velocidad de dos revoluciones/seg; continuar hasta que el surco se cierre en $\frac{1}{2}$ " de longitud; anotar el número de golpes, cuando éste sea inferior a 40,



Fotografía N° 7. Surco de la muestra en la cápsula de Casagrande. Autor

7. Revolver el suelo en la cápsula de Casagrande con la espátula y repetir las operaciones 5) y 6)
8. Tomar una muestra de aproximadamente 5 g de suelo en la zona donde se cerró el surco y pesarla de inmediato para obtener su contenido de humedad, lo que permitirá obtener un punto en el gráfico semi-logarítmico de humedad v/s número de golpes que se describe más adelante,
9. Vaciar el suelo de la cápsula de Casagrande a la de porcelana (que todavía contiene la mezcla de suelo inicial), continuar revolviendo el suelo con la espátula (durante el cual el suelo pierde humedad) y en seguida repetir las etapas (2) a (8),

10. Repetir etapas (2) a (9), 3 a 4 veces, hasta llegar a un número de golpes de 15 a 20.

3.3.1.3.1 CÁLCULO DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL)

Sobre un papel semi-logarítmico se construye la “curva de flujo” como se indica en la figura. Los puntos obtenidos tienden a alinearse sobre una recta lo que permite interpolar para la determinación de la ordenada LL para la abscisa $N = 25$ golpes.

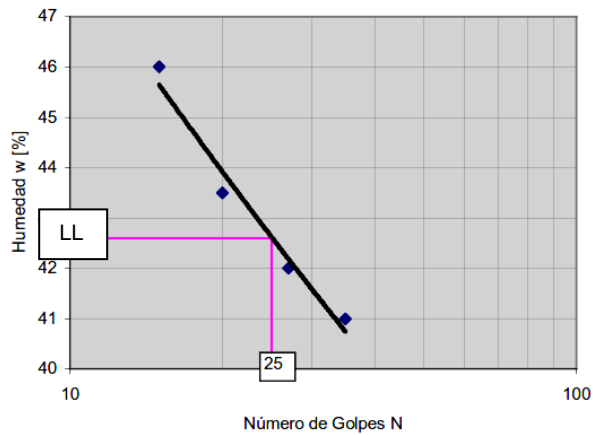


Gráfico N° 15. Método de cálculo del Límite Líquido

3.3.1.3.2 RESULTADOS

LÍMITE LIQUIDO - NORMA AASHTO T 89			
Ensayo N°	1	2	3
Tarro N°	48	119	26
P.suelo h+ T	23.29	25.32	24.48
P.suelo S+ T	19.54	21.00	20.15
P. Tarro	6.01	5.98	6.02
P. Agua	3.75	4.32	4.33
P. Suelo S.	13.53	15.02	14.13
Cont. Agua	27.72	28.76	30.64
N°. De Golpes	39	32	20

Tabla N° 6. Humedades del ensayo de LL. Autor

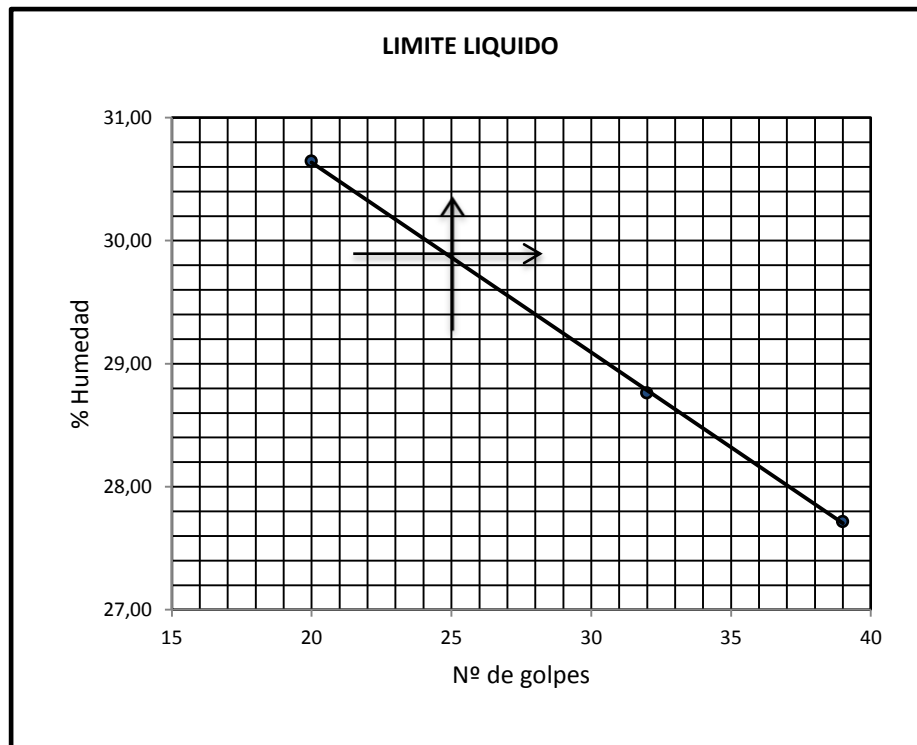


Gráfico N° 16. Resultado del Límite Líquido. Autor

3.3.1.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP).

El límite plástico es el contenido de humedad para el cual el suelo se fractura al ser amasado en bastoncitos de diámetro 1/8" (3 mm) cuando se amasa una pequeña porción de suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa. Se determina de la siguiente manera:

1. Utilizar una porción del material que queda del ensayo del límite líquido,

2. En los suelos muy plásticos LP puede ser muy diferente de LL; para evitar excesivas demoras en el ensayo con los suelos muy plásticos, es necesario secar el material al aire durante un cierto tiempo extendiéndolo sobre la placa de vidrio; se le puede igualmente colocar sobre el horno (a temperatura baja), al sol; en cualquier caso es necesario asegurarse que se seque de manera uniforme,

3. Tomar una bolita de suelo de 1 cm³ y amasarla sobre el vidrio con la palma de la mano hasta formar bastoncitos de 3 mm de diámetro,



Fotografía N° 8. Determinación del Límite Plástico. Autor

4. Reconstruir la bolita de suelo, uniendo el material con fuerte presión de las puntas de los dedos y amasar nuevamente un bastoncito hasta llegar al límite plástico,
5. El límite plástico, LP, corresponde al contenido de humedad para el cual un bastoncito de 3 mm, así formado, se rompe en trozos de 0.5 a 1 cm de largo, si no se está seguro de haber alcanzado LP, es recomendable amasar una vez más el bastoncito,
6. Pesar inmediatamente el bastoncito así formado para determinar su contenido de humedad,



Fotografía N° 9. Bastones de suelo para determinación del LP. Autor

7. Realizar 2 o 3 ensayos repitiendo etapas (3) a (6) y promediar; diferencias entre 2 determinaciones no deberán exceder a 2 %.

LIMITE PLÁSTICO - NORMA AASHTO T 90		
Ensayo N°	1	2
Tarro N°	82	81
P.suelo h+ T	8.52	9.16
P.suelo S+ T	8.05	8.56
P. Tarro	6.03	5.99
P. Agua	0.47	0.60
P. Suelo S.	2.02	2.57
Cont. Agua	23.27	23.35
Cont. Agua Pr.	23.31	

Tabla N° 7. Resultados de LP. Autor

3.3.2 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

La determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño, se llama análisis granulométrico; se hace por un proceso de tamizado en suelos de grano grueso, y por un proceso de sedimentación en agua en suelos de grano fino.

Según sean las características de los materiales finos de las muestras, el análisis con tamices se hace bien con la muestra entera, o bien con parte de ella, después de separar los finos por lavado.

El análisis granulométrico de una muestra de suelo consiste en determinar la proporción relativa en peso de los diferentes tamaños de granos, definidos por las aberturas de las mallas utilizadas

3.3.2.1 EQUIPO

- Balanza
- Juego de tamices

- Recipiente para el material
- Cuarteador
- Brocha
- Recipiente para lavado

3.3.2.2 PROCEDIMIENTO Y CÁLCULOS:

1. Pasar la muestra seca de suelo por la malla 3/8" y separar el material que pasa esta malla, a fin de determinar el porcentaje de finos de forma confiable posteriormente,
2. Pasar el material retenido en la malla 3/8" por las mallas 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2" y 3/8" y pesar las porciones de material retenido en cada una de ellas,



Fotografía N° 10. serie de tamizes. Autor

3. Mezclar homogéneamente el material que pasó por la malla 3/8" y tomar una muestra representativa según indicación del instructor,
4. Colocar la muestra obtenida en etapa (3) sobre la malla N° 200 y lavar el material, utilizando agua común, de tal manera que el agua arrastre los finos haciéndolos pasar por esta malla, hasta que el agua que pasa a través de la malla mantenga su transparencia,



Fotografía N° 11. Lavado del material en el tamiz N° 200. Autor

5. Verter cuidadosamente el residuo, en un recipiente desecador y permitirle sedimentar por un período de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte superficial de la suspensión se vuelva transparente, eliminar esta agua transparente y colocar el recipiente con la suspensión suelo y agua remanentes en el horno para secado,



Fotografía N° 12. Suelo lavado. Autor

6. Al día siguiente, regresar al laboratorio y pesar el residuo secado al horno o, en su defecto,
7. Finalmente, pasar la muestra (lavada y seca) por el tamiz N° 4 al N°200, registrando el peso retenido en cada malla.

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en un gráfico semilogarítmico como el indicado en la figura donde en abscisas se indican los diámetros de partículas y en ordenadas el porcentaje en peso que pasa.

3.3.2.3 RESULTADOS



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

USO: SUB-RASANTE

FECHA: 05/05/2013

SECTOR: QUITO - SUR

ELABORADO: D.C.P

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUB-RASANTE			
NORMA AASHTO T 88			
TAMIZ	PESO RET. ACUMULADO	% ACUMULADO	% QUE PASA
1/2	17	4	96
3/8	19	5	95
No. 4	30	8	93
No.10	44	11	89
No. 40	85	21	79
No. 200	191	48	52
Pasa N° 200	209	52	
TOTAL	400		

PESO ANTES DEL LAVADO : 400

PESO DESPUÉS DEL LAVADO: 191

Tabla N° 8. Resultado del ensayo de granulometría. Autor

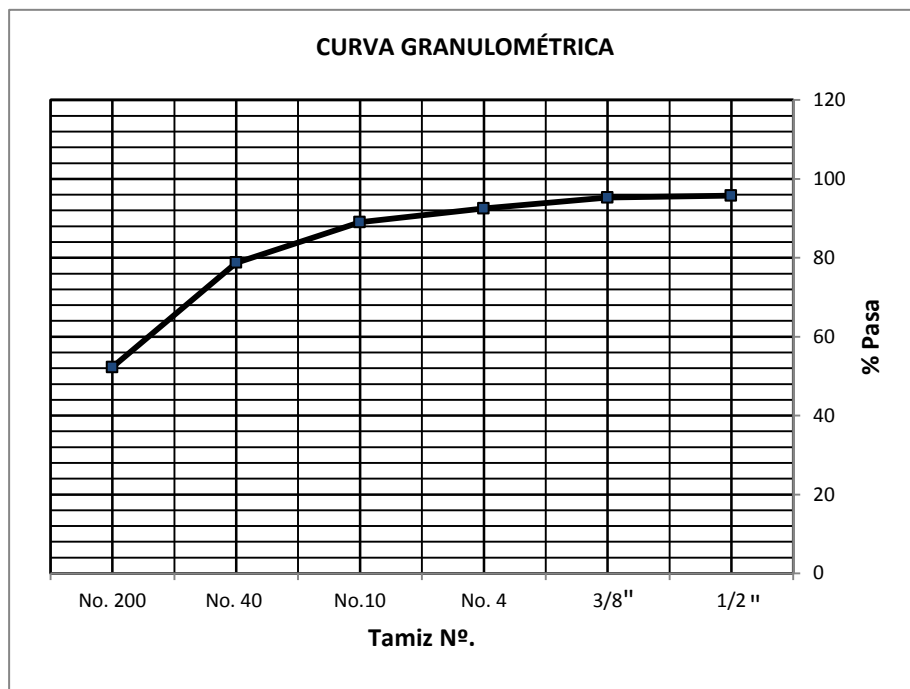


Gráfico N° 17. Curva granulométrica. Autor

3.3.3 PROCTOR MODIFICADO

En Mecánica de Suelos, el ensayo de compactación Proctor es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un suelo.

Existen dos tipos de ensayo Proctor normalizados; el "Ensayo Proctor Normal", y el "Ensayo Proctor Modificado". La diferencia específica entre ambos estriba en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del martillo y mayor altura de caída en el Proctor modificado.

La diferencia básica entre el ensayo Proctor Normal y el Modificado es la energía de compactación usada. En el Normal se hace caer un peso de 2.5 Kg de una altura de 30 centímetros, compactando la tierra en tres camadas con 25 golpes y, en el Modificado, un peso de 5 Kg de una altura de 45 centímetros, compactando la tierra en cinco camadas con 56 golpes. Esta diferencia se debe a la existencia de modernos equipos de compactación más pesados que permiten obtener densidades más altas en campo.



Fotografía N° 13. Equipo de compactación. Autor

Por medio de este ensayo se pretende obtener un dato teórico de la relación entre el porcentaje óptimo de humedad y el peso unitario máximo de los suelos compactados en un molde el cual ayudará a obtener en un futuro un grado de compactación con relación al peso unitario alcanzado en el terreno.

El ensayo consiste en compactar una porción de suelo en un cilindro con volumen conocido, haciéndose variar la humedad para obtener el punto de compactación máxima en el cual se obtiene la humedad óptima de compactación.

La energía de compactación viene dada por la ecuación:

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

Ecuación Nº 4. Energía de compactación.

Donde:

Y = energía a aplicar en la muestra de suelo;

n = número de capas a ser compactadas en el cilindro de moldeado;

N = número de golpes aplicados por capa;

P = peso del martillo;

H = altura de caída del martillo; y

V = volumen del cilindro.

El Grado de compactación de un terreno se expresa en porcentaje respecto al ensayo Proctor; es decir, una compactación del 85% de Proctor quiere decir que se alcanza el 85% de la máxima densidad posible para ese suelo.

3.3.3.1 EQUIPO

- molde de compactación
- martillo para compactación

- tamiz N° 4
- balanza +/- 1 gr
- horno de secado
- recipientes para humedad
- agua
- probeta

3.3.32 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

1. Se debe tomar 6 Kg (peso nominal) de suelo secado al aire, desmenuzado para que pase a través del tamiz N° 4;



Fotografía N° 14. Pesado del suelo. Autor

luego debe ser mezclado con la cantidad de agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad basado en porcentaje de peso seco; la humedad deberá ser, para este primer ensayo, aproximadamente un 4% a 5% menor que la humedad óptima estimada; Como mínimo es necesario dos contenidos de agua en el lado seco y húmedo del óptimo para definir exactamente la curva de compactación; debe quedar claro que el suelo y el agua en un ensayo deberían mezclarse uniformemente para asegurar su distribución homogénea.



Fotografía N° 15. Homogenización del suelo humectado. Autor

Una vez que la mezcla de suelo con el agua agregada sea homogénea tomar una muestra representativa para determinar el contenido de humedad,

2. Pesar el molde de compactación, sin incluir la base ni el collar,
3. Medir las dimensiones internas del molde de compactación para determinar su volumen,
4. Agregamos el suelo a compactar en el molde Proctor,
5. Compactar el suelo en cinco capas de 2,5 cm de espesor, aplicando 56 golpes con el martillo de compactación sobre cada una (para molde grande); se debe procurar que la última capa quede por sobre la altura del molde de compactación; en caso que la superficie de la última capa quede bajo la altura del molde, se debe repetir el ensayo; se debe evitar la última capa exceda el nivel del molde en más de 6 mm ya que al enrasar se estaría eliminando una parte significativa del material compactado, disminuyendo la energía de compactación por unidad de volumen,

6. Retirar cuidadosamente el collar de compactación, evitar girar el collar; en caso que se encuentre muy apretado, retirar con espátula el suelo que se encuentra adherido a los bordes por sobre el nivel del molde; finalmente enrasar perfectamente la superficie de suelo a nivel del plano superior del molde.



Fotografía N° 16. Enrasado del suelo compactado. Autor

7. Pesar el molde con el suelo compactado y enrasado.
8. Desmenuzar el suelo compactado y mezclarlo con suelo aún no utilizado; agregar un 2% de agua (en relación a los 6 Kg) y repetir los pasos cuatro a ocho; realizar la cantidad de ensayos suficientes para obtener una cantidad de puntos que permita determinar la humedad óptima y la densidad máxima.
9. Volver posteriormente al laboratorio para obtener los pesos secos de las muestras de humedad.



Fotografía N° 17. Pesos secos de las muestras. Autor

3.3.3.3 RESULTADOS:



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

SECTOR : QUITO - SUR

USO : SUB-RASANTE

FECHA : 06/05/2013

ELABORADO : D.C.P

RELACIÓN DENSIDAD - HUMEDAD (AASHTO T-180)

# Molde	6		6		6	
N° de capas	5		5		5	
Golpes/capa	56		56		56	
PSH+Mold.	10,347		10,582		10,682	
P Molde	6530		6530		6530	
Volum. Molde	2,125		2,125		2,125	
Dens. Humeda	1.796		1.907		1.954	
# Tarro	58	70	72	33	68	12
T+S humedo	95.68	96.45	90.02	93.15	101.71	93.93
T+ S Seco	87.48	88.26	81.29	83.98	89.58	83.11
Peso tarro	31.87	31.56	31.66	31.59	31.80	31.43
Cont. Agua	14.75	14.44	17.59	17.50	20.99	20.94
Cont. Prom. Agua	14.59		17.55		20.96	
Dens. Seca	1.567		1.622		1.615	

Tabla N° 9. Resultado del ensayo Proctor modificado. Autor

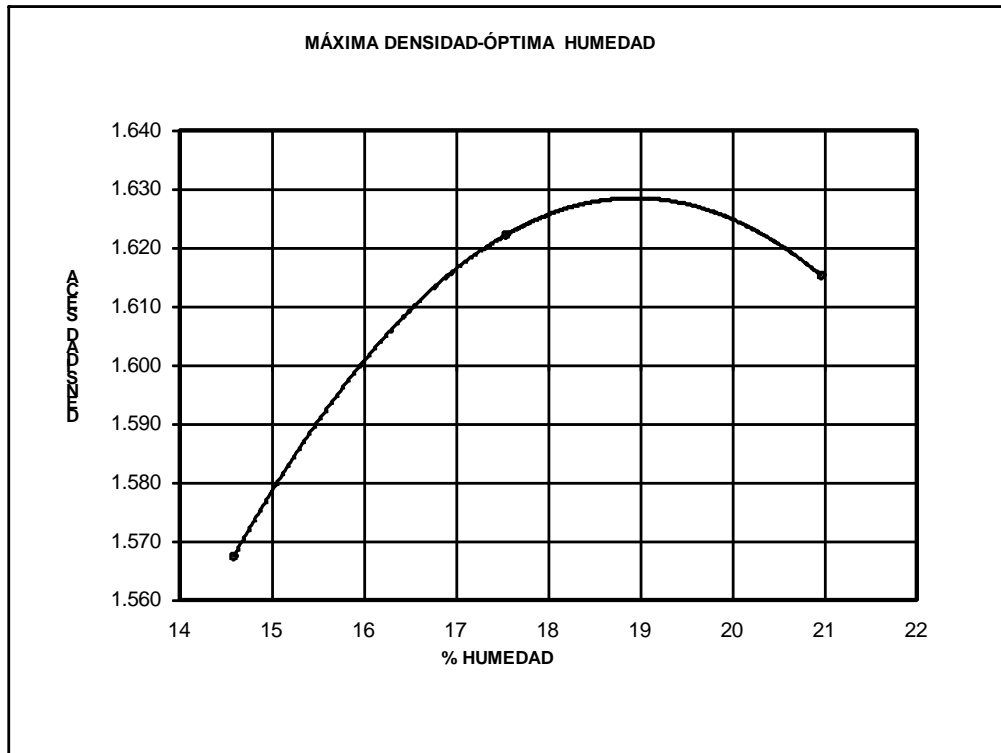


Gráfico N° 18. Curva densidad seca vs % de humedad. Autor

MAXIMA DENSIDAD SECA: **1,629 Kg/m³**
HUMEDAD ÓPTIMA: **19.00 %**

3.3.4 RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos.

3.3.4.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La muestra de suelo que se va a utilizar en el ensayo debe ser seleccionada para lograr resultados representativos, vamos a utilizar el material que pase por el tamiz N° 4.

Para iniciar el ensayo debemos determinar la humedad inicial a la cual se encuentra el suelo el cual va a ser utilizado en el procedimiento, una vez obtenido este dato debemos agregar a la muestra de suelo la cantidad de agua necesaria para que la misma se encuentre en su porcentaje óptimo de humedad (humedad-Proctor)y proceder a la compactación.

Preparamos 3 moldes CBR con sus respectivos collarines, pesas y bases perforadas que van a ser utilizados en el desarrollo del ensayo.

3.3.4.2 EQUIPO

- Molde de compactación para C:B:R con collarín y base perforada
- Martillo (Proctor modificado)
- Muestra de suelo
- Pesas de plomo
- Disco espaciador
- Material misceláneo: enrasador, balanza, horno, tanque para inmersión de muestra a saturar, tamiz N° 40, recipientes para humedades, cronometro
- Marco de carga CBR



Fotografía N° 18. Equipo CBR. Autor

3.3.4.3 PROCEDIMIENTO

Vamos a compactar tres muestras en los moldes preparados, usando para el primero 61 golpes, para el segundo 27 golpes y para el tercero 11 golpes. Se deben tomar muestras de humedad para cada molde con anticipación. Cada capa debe ser de 1" de espesor después de compactada y la última capa debe estar ½" más arriba de la unión del molde con su collarín. La humedad de las muestras así compactadas no debe ser ni mayor ni menor que 0.5% de la humedad óptima; de otra forma se debe repetir el ensayo.

CBR (AASHTO T – 193)			
Diámetro del molde (cm)	15.20		
Martillo (Kg)	5.50		
Nº de muestras	3		
Nº de capas	5		
Nº golpes / capa	61	27	11

Tabla N° 9. Ensayo CBR. Autor

Una vez que se tenga seleccionado el material a utilizar procedemos:

1. Humedecer la muestra a su porcentaje óptimo,
2. En el molde cilíndrico se coloca el disco espaciador y papel filtro, agregamos el suelo a compactar,
3. Compactar el suelo en cinco capas aplicando 61 golpes sobre cada una; se debe procurar que la última capa quede por sobre la altura del molde de compactación; en caso que la superficie de la última

capa quedara bajo la altura del molde, se debe repetir el ensayo; se debe evitar además que esta última capa exceda en altura el nivel del molde en más de 6 mm ya que al enrasar se estaría eliminando una parte significativa del material compactado, disminuyendo la energía de compactación por unidad de volumen,

4. Se quita el collarín, se enrasa la parte superior del molde,
5. Se volteará el molde y se quitará la base del molde perforada y el disco espaciador,



Fotografía N° 19. Extracción del disco espaciador. Autor

6. Se pesará el molde con la muestra, se determinará la densidad y la humedad de la muestra,
7. Repetimos los pasos del uno al seis para 27 y 11 golpes

3.3.4.4 EXPANSIÓN DEL MATERIAL

1. Se coloca papel filtro sobre la superficie enrasada, un plato metálico perforado y se volteará el molde,



Fotografía N° 20. Papel filtro en la base perforada. Autor

2. Sobre la superficie libre de la muestra se colocará papel filtro y se montará el plato con el vástago graduable. Luego sobre el plato se colocará varias pesas de plomo. La sobrecarga mínima será de 10 lbs.



Fotografía N° 21. Pesas sobre la muestra compactada. autor

3. Colocado el vástago y las pesas, se colocará el molde dentro de un tanque o depósito lleno con agua,
4. Se monta el trípode con un extensómetro y se toma una lectura inicial de cada una de las muestras y se tomará cada 24 horas

3.3.4.5 DRENAJE

Después de saturada la muestra, se saca del cilindro y cuidadosamente se drena durante 15 minutos el agua libre que queda. Como para drenar

bien el agua es necesario voltear el cilindro sujétese bien el disco y las pesas metálicas al hacer esta operación. Luego remuévase el disco, las pesas y el papel filtro, pésese la muestra.

3.3.4.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

1. Después que haya sido drenada y pesada la muestra, se colocará las pesas para el ensayo de penetración; deberá ser igual a la sobrecarga que tenía durante el ensayo de hinchamiento.
2. El molde con la muestra y la sobrecarga, se coloca debajo de la prensa y se asienta el pistón sobre la muestra.
3. Asentado el pistón, se coloca en cero el extensómetro que mide la penetración y el dial del deformímetro, procedemos a dar carga.



Fotografía N° 22. Ensayo del penetración CBR. Autor

4. Se hince el pistón en incrementos de 0.635mm a la velocidad de 1.27mm/minuto y se leen las cargas totales que ha sido necesario aplicar hasta hincar el pistón 0.50”.

Tiempo min : seg	Penetración mm
0:00	0.000
0:30	0.635
1:00	1.270
1:30	1.905
2:00	2.540
3:00	3.810
4:00	5.080
5:00	6.350
6:00	7.620
8:00	10.160
10:00	12.700

Tabla N° 10. Valores de tiempo y penetración para el ensayo CBR. Autor

5. Una vez hincado el pistón hasta 0.50" se suelta la carga lentamente; se retira el molde de la prensa y se quitan las pesas y la base metálica perforada.
6. Finalmente se determina el contenido de humedad de la muestra.

Se recomienda tomar el promedio de los diferentes contenidos de humedad (tres de la parte superior y tres de la parte inferior de la muestra).

3.3.4.7 CALCULO DEL CBR

Las lecturas tomadas, tanto de las penetraciones como de las cargas, se representan gráficamente en un sistema de coordenadas como se indica en el Gráfico N° 19.

Si la curva esfuerzo - penetración que se obtiene es semejante a la del ensayo N° 1 del Gráfico N° 19, los valores anotados serán los que se tomen en cuenta para el cálculo de CBR.

En cambio, si las curvas son semejantes a las correspondientes a los N° 2 y N° 3, las curvas deberán ser corregidas trazando tangentes en la forma

indicada en el Gráfico N° 19. Los puntos A y B, donde dichas tangentes cortan el eje de abscisas, serán los nuevos ceros de las curvas.

Las cargas unitarias y penetraciones se determinaran a partir de estos ceros. Si analizamos la curva del ensayo N° 3 tendremos que el esfuerzo correspondiente a la penetración corregida de 0.1" será de 300 lb/pulg² en lugar de 120 lb/pulg², que es la correspondiente a la lectura inicial sin corregir de 0.1".

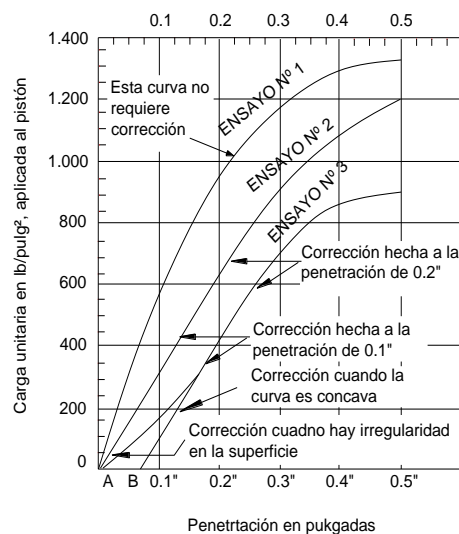


Gráfico N° 18. Curvas que relacionan la hincada del pistón con las presiones aplicadas

$$\text{CBR} = \frac{\text{CARGA UNITARIA DEL ENSAYO}}{\text{CARGA UNITARIA PATRÓN}} \times 100 (\%)$$

Ecuación N° 5. Cálculo de CBR. Autor

CBR = El número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón.

En la práctica, los resultados se presentan como un número entero sin expresión de porcentaje.

Para determinar el CBR se toma como material de comparación la piedra triturada que sería el 100%, es decir CBR = 100%.

3.3.4.8 RESULTADOS:



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE
SECTOR : QUITO - SUR
USO : SUBRASANTE

FECHA : 07/05/2013
ELABORADO: D.C.P

NORMA AASHTO T - 193

Molde N°	1 LAB		2 LAB		3 LAB	
	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES
N° de capas	5		5		5	
Golpes por capa	61		27		11	
REMOJO	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES
Peso muestra húmeda + molde	12830	12862	12740	12875	12215	12398
Peso del molde	8393	8393	8482	8482	8173	8173
Peso muestra húmeda	4437	4469	4258	4393	4042	4225
Volumen de la muestra	2286	2286	2286	2286	2317	2317
Densidad Húmeda	1.941	1.955	1.863	1.922	1.744	1.823
Densidad seca	1.639	1.604	1.570	1.550	1.470	1.422

Tabla N° 12. Densidades CBR. Autor

CONTENIDO DE AGUA

Tarro N°	39	74	44	53	12	49	81	34	43	27	68	24
Peso muestra húmeda + tarro	96.19	92.75	87.66	92.90	95.24	94.54	93.30	86.62	93.34	89.73	90.04	81.24
Peso muestra seca + tarro	86.23	83.23	77.67	81.93	85.17	84.73	81.26	76.02	83.63	80.64	77.28	70.33
Peso agua	9.96	9.52	9.99	10.97	10.07	9.81	12.04	10.6	9.71	9.09	12.76	10.91
Peso tarro	31.94	31.65	31.85	31.89	31.43	31.83	31.27	31.65	31.86	31.68	31.80	31.81
Peso muestra seca	54.29	51.6	45.82	50.04	53.7	52.9	49.99	44.37	51.77	48.96	45.48	38.52
Contenido de humedad	18.35	18.46	21.80	21.92	18.74	18.54	24.08	23.89	18.76	18.57	28.06	28.32
Humedad promedio	18.40		21.86		18.64		23.99		18.66		28.19	
Agua absorbida	3.46				5.35				9.53			

Tabla N° 13. Humedades CBR. Autor



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE
SECTOR : QUITO-SUR
USO : SUB-RASANTE

FECHA : 07/05/2013
ELABORADO : D.C.P

DATOS DE ESPONJAMIENTO														
Mes y Día	hora	tiempo transc. días	MOLDE 1 LAB				MOLDE 2 LAB				MOLDE 3 LAB			
			L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento mm %		L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento mm %		L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento mm %	
07/05/2013	9:00	0	19.00	126		0	19.00	126	0.00	0	19.00	126	0.00	0
08/05/2013	9:00	1	19.08		0.08	0.06	19.62		0.62	0.49	19.80		0.80	0.63
09/05/2013	9:00	2	19.15		0.15	0.12	19.72		0.72	0.57	19.91		0.91	0.72
10/05/2013	9:00	3	19.24		0.24	0.19	19.85		0.85	0.67	20.04		1.04	0.83
11/05/2014	9:00	4	19.28		0.28	0.22	19.96		0.96	0.76	20.10		1.10	0.87
12/05/2015	9:00	5	19.32		0.32	0.25	20.01		1.01	0.80	20.10		1.10	0.87

PENETRACIÓN

Tiempo min:seg	Penetr. mm	carga estand. Kg/cm2	MOLDE 1 LAB				MOLDE 2 LAB				MOLDE 3 LAB			
			carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %	carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %	carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %
0:00	0.000		0	0.0			0.0	0.0			0.0	0.0		
0:30	0.635		3.5	2.1			2.0	1.2			1.0	0.6		
1:00	1.270		8.5	5.1			5.0	3.0			3.0	1.8		
1:30	1.905		14	8.4			8.5	5.1			5.5	3.3		
2:00	2.540	70.4	21	12.6	15.0	21	12.0	7.2	7.0	10	8.0	4.8	6.0	9
3:00	3.810		34.5	20.8			19.0	11.4			13.0	7.8		
4:00	5.080	105.6	44.5	26.8			26.5	16.0			17.0	10.2		
5:00	6.350		52	31.3			32.0	19.3			20.0	12.0		
6:00	7.620	133.8	58.5	35.2			36.5	22.0			22.5	13.5		
8:00	10.160	161.9	69	41.5			44.5	26.8			27.0	16.3		
10:00	12.700	183.0	79	47.6			51.0	30.7			30.0	18.1		

Tabla Nº 14. Esponjamiento y penetración ensayo CBR. Autor

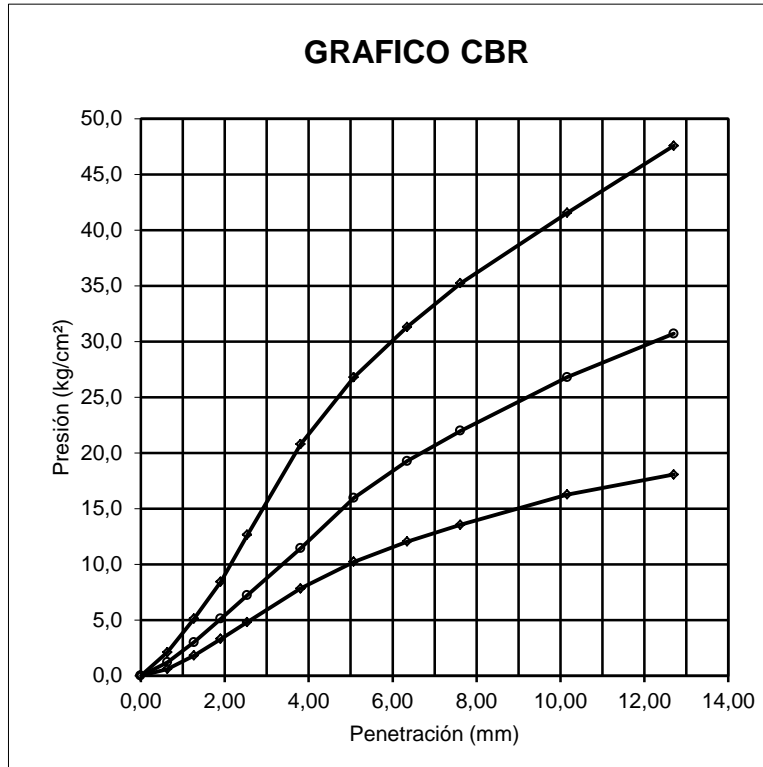


Gráfico N° 19. CBR del suelo natural. Autor

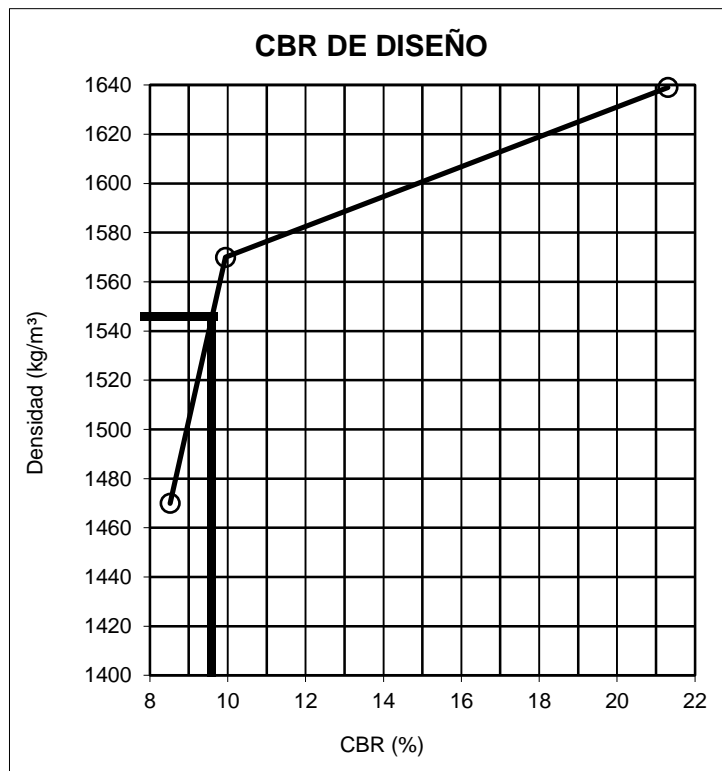


Gráfico N° 20. CBR de diseño del suelo natural. Autor

CBR AL 95% = 9.5

6.3.5 RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA (CBR) DEL SUELO CON ENZIMAS

Con los ensayos realizados anteriormente obtenemos datos de partida para la investigación de la estabilización con enzimas, teniendo así resultados bases.

3.3.5.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La muestra debe ser seleccionada para lograr resultados representativos, vamos a utilizar el material que pase por el tamiz N° 4.

Obteniendo la humedad inicial a la que se encuentra el suelo, calculamos la cantidad agua+enzima para agregar y llegar al porcentaje óptimo de humedad (Proctor).

Humectamos la muestra de suelo con la solución agua+enzima y la dejamos 24 horas para la homogenización de sus partículas. La almacenamos en fundas para que no pierdan humedad.



Fotografía N° 23. Humectación del suelo con enzimas orgánicas. Autor

3.3.5.2 EQUIPO

- Molde de compactación para CBR con collarín y base perforada
- Martillo (Proctor modificado)
- Muestra de suelo

- Pesas de plomo
- Disco espaciador
- Material misceláneo: enrasador, balanza, horno, tanque para inmersión de muestra a saturar, tamiz N° 40, recipientes para humedades, cronometro
- Marco de carga CBR
- Enzimas orgánicas (líquida)



Fotografía N° 24. Enzima Orgánica en estado natural. Autor

3.3.5.3 PROCEDIMIENTO

Las características básicas de este ensayo son las mismas que del ensayo CBR del suelo descrito en el ensayo anterior, partiendo de la preparación de la muestra (3.3.5.1).

3.3.5.4 CURADO DE LAS MUESTRAS

Como procedimiento e investigación del proceso de mejoramiento de la estabilización con enzimas realizamos dos ensayos de tres muestras cada uno.

El primer grupo de muestras lo sometemos a un proceso de curado previo a la inmersión en agua, este proceso consiste en meter al horno a 65°C las muestras compactadas durante 3 días como recomienda el productor de la enzima, todo esto para que la aplicación del producto enzimático nos brinde mejores resultados.



Fotografía N° 25. Curado al horno de las muestras. Autor

El segundo grupo de muestras moldeadas no serán sometidas al proceso de curado al horno, emulando así las situaciones que en muchas ocasiones se presentan en obras como es el caso de las lluvias. Las muestras van directamente se las sumerge en agua.

3.3.5.5 EXPANSIÓN DEL MATERIAL

1. Determinada la densidad y humedad se coloca el papel filtro sobre la superficie enrasada, un plato metálico perforado y se volteará el molde
2. Sobre la superficie libre de la muestra se colocará papel filtro y se montará el plato con el vástago graduable. Luego sobre el plato se colocará varias pesas de plomo. La sobrecarga mínima será de 10 lbs.
3. Colocado el vástago y las pesas, se colocará el molde dentro de un tanque o depósito lleno con agua



Fotografía Nº 26. Muestras sumergidas en agua. Autor

4. Se monta el trípode con un extensómetro y se toma una lectura inicial de cada una de las muestras y se tomará cada 24 horas

3.3.5.6 DRENAJE

Después de saturada la muestra, se saca del cilindro y cuidadosamente se drena durante 15 minutos el agua libre que queda. Como para drenar bien el agua es necesario voltear el cilindro sujétese bien el disco y las pesas metálicas al hacer esta operación. Luego remuévase el disco, las pesas y el papel filtro, pésese la muestra.



Fotografía Nº 27. Pesado de la muestra sacada del agua. Autor

3.3.5.7 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

1. Después que haya sido drenada y pesada la muestra, se colocará las pesas para el ensayo de penetración; o sea que la sobrecarga

para la prueba de penetración deberá ser prácticamente igual a la sobrecarga que tenía durante el ensayo de hinchamiento

- 4 El molde con la muestra y la sobrecarga, se coloca debajo de la prensa y se asienta el pistón sobre la muestra.
- 5 Una vez asentado el pistón, se coloca en cero el extensómetro que mide la penetración y el dial del extensómetro también se coloca en cero, procedemos a dar carga.
- 6 Se hinca el pistón en incrementos de 0.635mm a la velocidad de 1.27mm/minuto y se leen las cargas totales que ha sido necesario aplicar hasta hincar el pistón 0.50”.
- 7 Una vez hincado el pistón hasta 0.50”, se suelta la carga lentamente; se retira el molde de la prensa y se quitan las pesas y la base metálica perforada.



Fotografía N° 28. Muestra ensayada CBR. Autor

- 8 Finalmente se determina el contenido de humedad de la muestra.

3.3.5.8 CALCULO DEL CBR

Similar al cálculo descrito en el numeral 3.3.4.3.

3.3.5.9 RESULTADOS

RESULTADOS CBR DEL SUELO CON ENZIMA SIN CURADO DE LA MUESTRA



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

SECTOR : QUITO - SUR

USO : SUBRASANTE

FECHA : 14/05/2013

ELABORADO: D.C.P

ENSAYO C. B. R.
NORMA AASHTO T - 193

Molde N°	4 LAB		5 LAB		6 LAB	
	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES
N° de capas	5		5		5	
Golpes por capa	61		27		11	
Peso muestra húmeda + molde	12905	12956	11723	11810	11180	11397
Peso del molde	8424	8424	7196	7196	7195	7195
Peso muestra húmeda	4481	4532	4527	4614	3985	4202
Volumen de la muestra	2286	2286	2432	2432	2268	2268
Densidad Húmeda	1.960	1.983	1.861	1.897	1.757	1.853
Densidad seca	1.652	1.639	1.566	1.555	1.482	1.462

CONTENIDO DE AGUA

Tarro N°	29	72	12	39	96	59	11	73	40	11	16	26
Peso muestra húmeda + tarro	93.61	94.15	81.62	80.37	94.98	92.33	88.69	91.06	97.25	96.61	94.92	92.50
Peso muestra seca + tarro	83.86	84.35	72.94	71.96	84.96	82.74	78.41	80.41	86.92	86.54	81.5	79.73
Peso agua	9.75	9.80	8.68	8.41	10.02	9.59	10.28	10.65	10.33	10.07	13.42	12.77
Peso tarro	31.76	31.66	31.43	31.94	31.71	32.00	31.67	31.89	31.78	31.67	31.66	31.74
Peso muestra seca	52.10	52.7	41.51	40.02	53.3	50.74	46.74	48.52	55.14	54.87	49.84	47.99
Contenido de humedad	18.71	18.60	20.91	21.01	18.82	18.90	21.99	21.95	18.73	18.35	26.93	26.61
Humedad promedio	18.66		20.96		18.86		21.97		18.54		26.77	
Agua absorbida	2.31				3.11				8.22			

Tabla N° 15. Densidad y humedad el ensayo CBR con enzimas sin curar. Autor



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

SECTOR : QUITO - SUR

USO : SUBRASANTE

FECHA : 14/05/2013

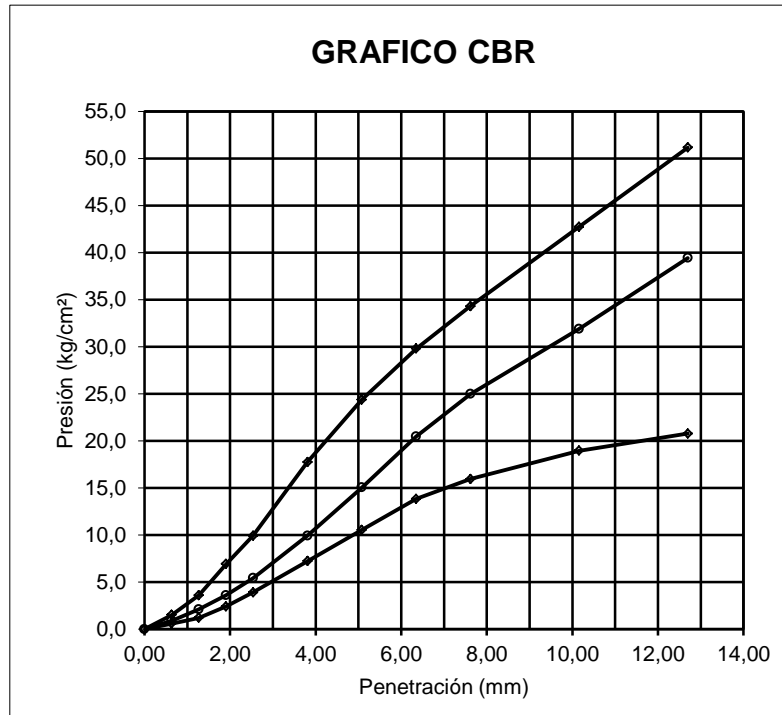
ELABORADO: D.C.P

DATOS DE ESPONJAMIENTO														
Mes y Día	hora	tiempo transc. días	MOLDE 4 LAB				MOLDE 5 LAB				MOLDE 6 LAB			
			L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento		L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento		L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento	
					mm	%			mm	%			mm	%
14/05/2013	9:00	0	30.49	126		0	32.92	134	0.00	0	30.80	125	0.00	0
15/05/2013	9:00	1	31.53		1.04	0.83	33.70		0.78	0.58	32.00		1.20	0.96
16/05/2013	9:00	2	31.66		1.17	0.93	34.10		1.18	0.88	32.20		1.40	1.12
17/05/2013	9:00	3	31.74		1.25	0.99	34.38		1.46	1.09	32.34		1.54	1.23
18/05/2013	9:00	4	31.76		1.27	1.01	34.50		1.58	1.18	32.49		1.69	1.35
19/05/2013	9:00	5	31.81		1.32	1.05	34.61		1.69	1.26	32.55		1.75	1.40
20/05/2013	9:00	6	31.86		1.37	1.09	34.65		1.73	1.29	32.58		1.78	1.42

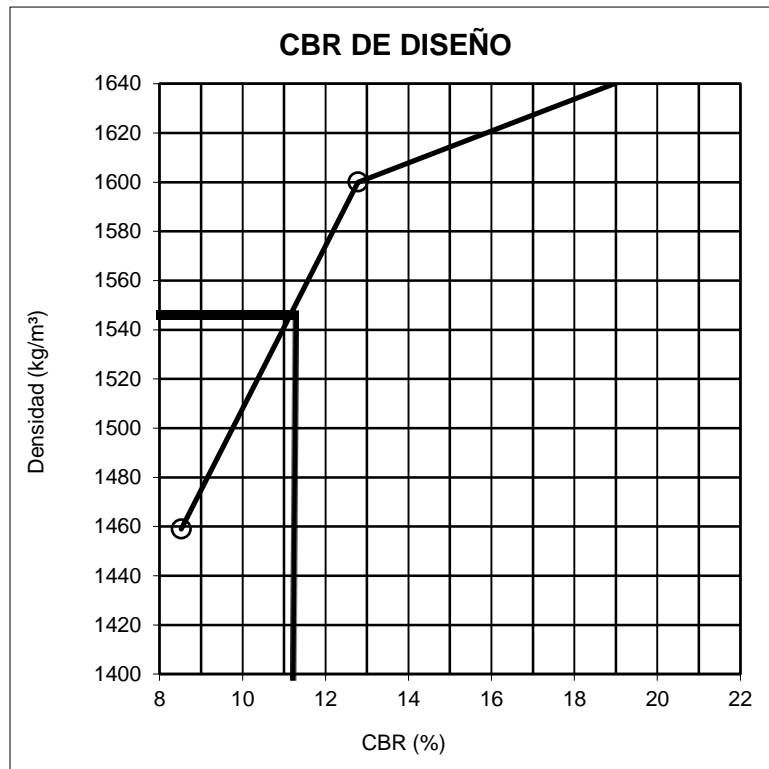
PENETRACIÓN

Tiempo min:seg	Penetr. mm	carga estand. Kg/cm2	MOLDE 4 LAB				MOLDE 5 LAB				MOLDE 6 LAB			
			carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %	carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %	carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %
0:00	0.000		0	0.0			0.0	0.0			0.0	0.0		
0:30	0.635		3.5	2.1			2.5	1.5			1.5	0.9		
1:00	1.270		9.5	5.7			6.5	3.9			4.0	2.4		
1:30	1.905		15	9.0			11.5	6.9			7.0	4.2		
2:00	2.540	70.4	21	12.6	14.0	20	17.0	10.2	12.5	18	9.5	5.7	6.5	9
3:00	3.810		32	19.3			27.5	16.6			14.5	8.7		
4:00	5.080	105.6	44	26.5			37.0	22.3			18.5	11.1		
5:00	6.350		52	31.3			43.0	25.9			21.5	12.9		
6:00	7.620	133.8	59	35.5			48.5	29.2			24.0	14.5		
8:00	10.160	161.9	71	42.7			57.0	34.3			27.0	16.3		
10:00	12.700	183.0	81	48.8			64.0	38.5			29.5	17.8		

Tabla Nº 16. Esponjamiento y penetración CBR con enzima sin curar. Autor



**Gráfico N° 21. CBR del suelo con enzima sin curar.
Autor**



**Gráfico N° 22. CBR del suelo con enzima sin curar.
Autor**

CBR AL 95%= 11.2

RESULTADOS DE CBR DEL SUELO CON ENZIMA CON CURADO DE LA MUESTRA



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

SECTOR : QUITO - SUR

USO : SUB-RASANTE

FECHA : 13/05/2013

ELABORADO: D.C.P

ENSAYO C. B. R. NORMA AASHTO T - 193

Molde N°	1 LAB		2 LAB		3 LAB	
N° de capas	5		5		5	
Golpes por capa	61		27		11	
REMOJO	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES	ANTES	DESPUES
Peso muestra húmeda + molde	12855	12890	12815	12880	12190	12398
Peso del molde	8393	8393	8482	8482	8173	8173
Peso muestra húmeda	4462	4497	4333	4398	4017	4225
Volumen de la muestra	2286	2286	2286	2286	2317	2317
Densidad Húmeda	1.952	1.967	1.895	1.924	1.734	1.823
Densidad seca	1.646	1.609	1.600	1.567	1.459	1.416

CONTENIDO DE AGUA

Tarro N°	2	8	6	72	73	74	59	49	58	27	14	82
Peso muestra húmeda + tarro	91.61	90.68	90.8	91.45	92.84	88.35	87.08	82.72	96.43	98.79	81.42	85.10
Peso muestra seca + tarro	82.29	81.50	80.06	80.60	83.34	79.53	76.86	73.28	86.13	88.26	70.16	73.29
Peso agua	9.32	9.18	10.74	10.85	9.50	8.82	10.22	9.44	10.30	10.53	11.26	11.81
Peso tarro	32.45	31.66	31.86	31.66	31.89	31.65	32.00	31.83	31.87	31.68	31.39	31.81
Peso muestra seca	49.84	49.8	48.2	48.94	51.5	47.88	44.86	41.45	54.26	56.58	38.77	41.48
Contenido de humedad	18.70	18.42	22.28	22.17	18.46	18.42	22.78	22.77	18.98	18.61	29.04	28.47
Humedad promedio	18.56		22.23		18.44		22.78		18.80		28.76	
Agua absorbida	3.67				4.34				9.96			

Tabla N° 17. Densidades y humedades CBR con enzima curada. Autor



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE
SECTOR : QUITO - SUR
USO : SUBRASANTE

FECHA : 13/05/2013
ELABORADO : D.C.P

DATOS DE ESPONJAMIENTO														
Mes y Día	hora	tiempo transc. días	MOLDE 1 LAB				MOLDE 2 LAB				MOLDE 3 LAB			
			L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento mm %		L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento mm %		L. Dial mm	H. Mues. mm	esponjamiento mm %	
13/05/2013	9:00	0	19.73	126		0	10.01	126	0.00	0	5.88	126	0.00	0
14/05/2013	9:00	1	20.14		0.41	0.33	10.43		0.42	0.33	6.44		0.56	0.44
15/05/2013	9:00	2	20.27		0.54	0.43	10.65		0.64	0.51	6.69		0.81	0.64
16/05/2013	9:00	3	20.30		0.57	0.45	10.75		0.74	0.59	6.76		0.88	0.70
17/05/2013	9:00	4	20.39		0.66	0.52	10.83		0.82	0.65	6.82		0.94	0.75
18/05/2013	9:00	5	20.44		0.71	0.56	10.85		0.84	0.67	6.85		0.97	0.77

PENETRACIÓN

Tiempo min:seg	Penetr. mm	carga estand. Kg/cm2	MOLDE 4 LAB				MOLDE 5 LAB				MOLDE 6 LAB			
			carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %	carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %	carga dial	Presión Kg/cm2	Presión correg. Kg/cm2	valor C.B.R. %
0:00	0.000		0	0.0			0.0	0.0			0.0	0.0		
0:30	0.635		2.5	1.5			1.5	0.9			1.0	0.6		
1:00	1.270		6	3.6			3.5	2.1			2.0	1.2		
1:30	1.905		11.5	6.9			6.0	3.6			4.0	2.4		
2:00	2.540	70.4	16.5	9.9	14.0	20	9.0	5.4	9.0	13	6.5	3.9	6.0	9
3:00	3.810		29.5	17.8			16.5	9.9			12.0	7.2		
4:00	5.080	105.6	40.5	24.4			25.0	15.1			17.5	10.5		
5:00	6.350		49.5	29.8			34.0	20.5			23.0	13.8		
6:00	7.620	133.8	57	34.3			41.5	25.0			26.5	16.0		
8:00	10.160	161.9	71	42.7			53.0	31.9			31.5	19.0		
10:00	12.700	183.0	85	51.2			65.5	39.4			34.5	20.8		

Tabla Nº 18. Esponjamiento y penetración CBR con enzima curada. Autor

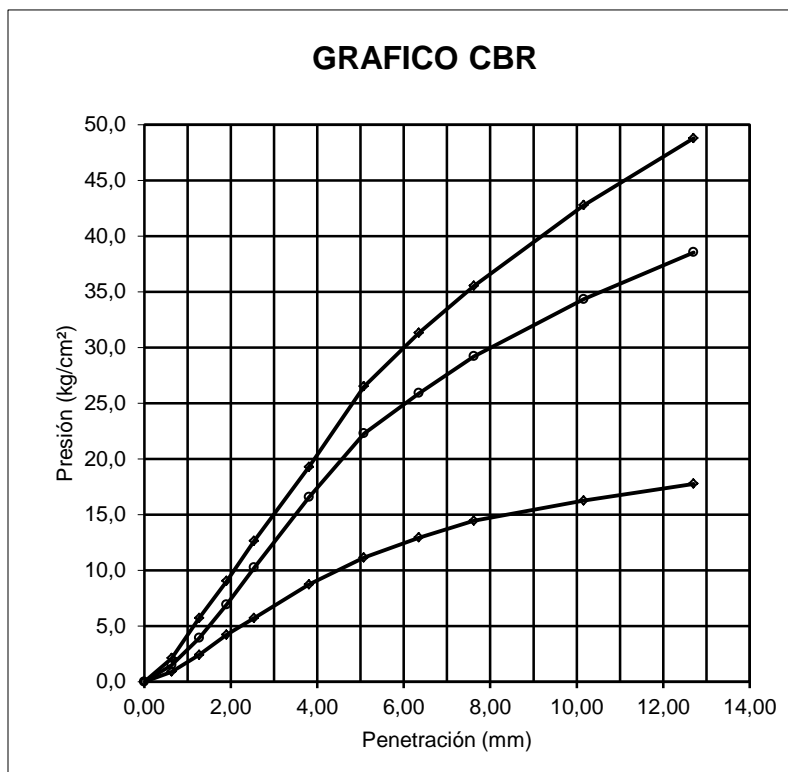


Gráfico N° 23. CBR del suelo con enzima con curado. Autor

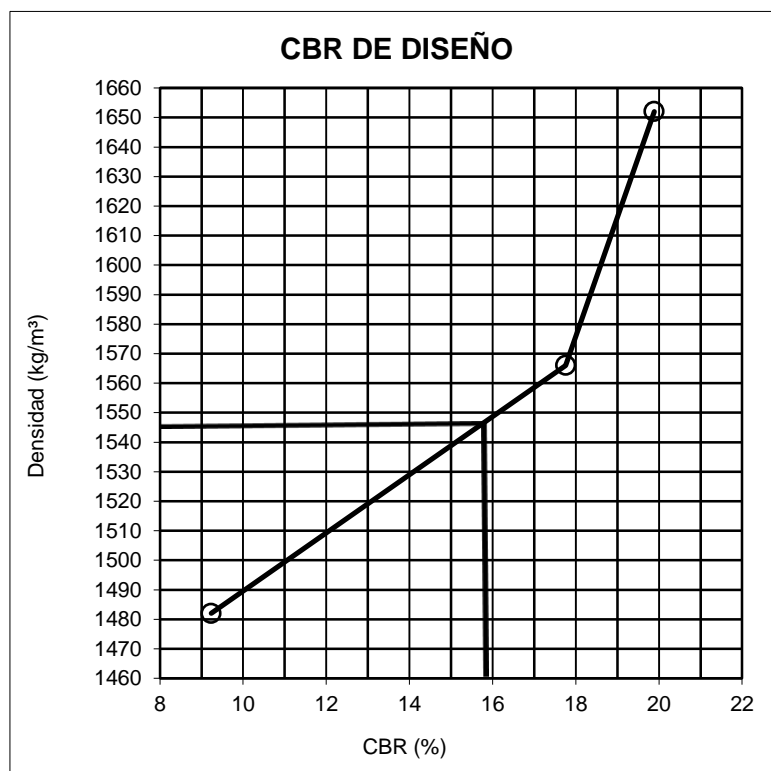


Gráfico N° 24. CBR de diseño del suelo con enzima con curado. Autor

CBR AL 95% = 15.8

3.3.6 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE SUELO - CEMENTO

El suelo cemento es un producto endurecido resultante de una mezcla íntima compactada de suelo, cemento y agua, en proporciones establecidas a través de una dosificación racional, ejecutada de acuerdo con las normas aplicables al suelo en estudio.

3.3.6.1 PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN

Es la secuencia de ensayos realizados con una determinada mezcla de suelo, cemento y agua, seguida de la interpretación de los resultados por medio de criterios preestablecidos; el resultado final es la fijación de las tres variables citadas, el objetivo de dosificación pasa a ser sólo la fijación de cantidad adecuada de cemento, sin embargo el abastecimiento, apenas con los datos indicativos básicos, la humedad óptima y el peso específico seco aparente máximo de la muestra ensayada.

3.3.6.2 DOSIFICACIÓN DE SUELO – CEMENTO

La determinación de la adecuada cantidad de cemento se basa en el hecho de que suelos mezclados con pequeñas cantidades de cemento, estando debidamente compactados y curados, mejoran sensiblemente sus características originales de resistencia mecánica, convirtiéndose muy superiores a lo obtenido con otros materiales utilizados como capas de pavimentos. La acción de las cargas y la variación de condiciones climáticas podrían, después de cierto tiempo, disgregar la mezcla endurecida, lo que haría que perdiese el grado de estabilización alcanzado, transformándose en una simple mezcla compactada de suelo con cemento, de calidad baja e indefinida. La dosificación se la hace experimentalmente: diferentes cantidades de cemento son usadas en los ensayos y el análisis de resultados indica el menor de ellos que es capaz de estabilizar el suelo sobre el concepto del suelo – cemento.

3.3.6.3 ELECCIÓN DE CANTIDAD DE CEMENTO PARA EL ENSAYO DE COMPACTACIÓN

La determinación de la cantidad adecuada de cemento se fundamenta en el análisis del comportamiento de las probetas de ensayo con diferentes cantidades de cemento.

En general, son ensayadas tres cantidades, diferenciando la cantidad mediante dos puntos porcentuales.

La mejor manera de fijar las cantidades de cemento para los ensayos es la comparación del suelo en estudio con otros ya ensayados, llevándose a consideración la granulometría, los índices de consistencia, el origen geológico, la coloración, la región de donde proviene y profundidad de la muestra.

3.3.6.4 ENSAYO DE COMPACTACIÓN DE SUELO – CEMENTO

El método que utilizaremos para moldear el suelo es análogo al procedimiento al ensayo Proctor. Una vez obtenidas la muestras de suelo con los diferentes porcentajes de cemento las sometemos al proceso de curado para que el cemento fragua y aporte con resistencia a la mezcla. Realizaremos 3 especímenes con cada porcentaje de cemento para ensayar y constatar su resistencia a los días: 7, 14 y 28.

Los porcentajes de cemento con los que se van a realizar los ensayos son: 6%, 9%, 12% y 15%

3.3.6.5 EQUIPO

- Molde de compactación
- Martillo para compactación
- Tamiz N° 4
- Balanza +/- 1 gr

- Horno de secado
- Recipientes para humedad
- Agua
- Probeta
- Cemento
- Desmoldador de muestra

3.3.6.6 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

1. Se debe tomar 6 Kg (peso nominal) de suelo secado al aire, desmenuzado para que pase a través del tamiz N° 4; luego debe ser mezclado homogéneamente con la cantidad de cemento, agregamos el aumento de agua necesaria para alcanzar el contenido óptimo de humedad basado en el ensayo Proctor obtenido anteriormente,



Fotografía N° 29. Incorporación del cemento. Autor

Una vez que la mezcla de suelo-cemento con el agua agregada sea homogénea tomar una muestra representativa para determinar el contenido de humedad

2. Pesar el molde de compactación, sin incluir la base ni el collar,
3. Medir las dimensiones internas del molde de compactación para determinar su volumen,

4. Agregamos el suelo a compactar en el molde,
5. Compactar el suelo siguiendo el procedimiento Proctor, en 5 capas aplicando 56 golpes sobre cada una (para molde grande); se debe procurar que la última capa quede por sobre la altura del molde de compactación; en caso que la superficie de la última capa quedara bajo la altura del molde, se debe repetir el ensayo; se debe evitar además que esta última capa exceda en altura el nivel del molde en más de 6 mm ya que al enrasar se estaría eliminando una parte significativa del material compactado, disminuyendo la energía de compactación por unidad de volumen,
6. Retirar cuidadosamente el collar de compactación, evitar girar el collar; en caso que se encuentre muy apretado, retirar con espátula el suelo que se encuentra adherido a los bordes por sobre el nivel del molde; finalmente enrasar perfectamente la superficie de suelo a nivel del plano superior del molde,
7. Pesar el molde con el suelo compactado y enrasado,
8. Desmenuzar el suelo compactado y mezclarlo con suelo aún no utilizado; agregar un 2% de agua (en relación a los 6 Kg) y repetir los pasos 4 a 8; realizar la cantidad de ensayos que el instructor indique, suficientes para obtener una cantidad de puntos que permita determinar la humedad óptima y la densidad máxima,
9. Volver posteriormente al laboratorio para obtener los pesos secos de las muestras de humedad,

3.3.6.7 EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA COMPACTADA

Después de compactar la muestra en el molde cilíndrico, procedemos a la extracción del suelo compactado dentro del cilindro. El cual va a ser ensayado a compresión en los tiempos establecidos anteriormente para determinar la resistencia desarrollada por el aporte del cemento.

El ensayo a compresión que se va a aplicar la mezcla suelo – cemento es similar al ensayo establecido para probetas de hormigón.

La extracción de núcleo de suelo – cemento compactado en el cilindro Proctor los haremos de la siguiente manera:

1. Disponer del equipo respectivo para la extracción,
2. Colocamos el molde compactado sobre el pistón, debemos tener la precaución que el molde embone en la parte superior del aparato de extracción,
3. Una vez ubicada la muestra, procedemos a ejercer carga con el pistón para que la muestra se extraiga por la parte superior,



Fotografía N° 30. Extracción de la muestra suelo-cemento. Autor

4. Extraída la muestra la sometemos al proceso de curado
5. Repetimos el proceso de compactación y extracción de las muestras para cada muestra de suelo – cemento de su respectivo porcentaje de cemento incorporado.

3.3.6.8 ENSAYO A COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO – CEMENTO

Una vez cumplido el periodo de curado de las probetas de suelo – cemento procedemos con el ensayo a compresión simple para determinar el incremento de resistencia desarrollada por la mezcla.

Desarrollo del ensayo:

1. Diluimos azufre para uniformizar las caras de las probetas de suelo – cemento para que la carga aplicada sea uniforme en toda el área de contacto,
2. Una vez q este diluido el azufre vertimos el liquido en el molde para aplicar a las caras de la probeta,
3. Con el mortero de azufre uniformizamos las caras de todas las probetas antes de ensayar,
4. A continuación, ensayamos las probetas a compresión simple en la maquina universal



Fotografía Nº 31. Ensayo a compresión de la probeta suelo-cemento. Autor

5. Una vez ensayadas las probetas de suelo – cemento registramos la carga alcanzada de cada una de ellas.
6. Repetimos todo el procedimiento para cada una de las probetas con sus respectivos porcentajes de cemento agregado.

3.3.6.9 CÁLCULOS

Después de haber obtenidos los datos de los ensayos realizados, procesamos la información para resultados logrados con la estabilización:

Datos:

Porcentaje de cemento utilizado= 6%

Cilindro utilizado:

MOLDE PARA PROCTOR				
NUMERO	PESO gr	DIÁMETRO mm	ALTURA mm	VOLUMEN mm ³
6	6530	15.26	11.62	2125

Tabla N° 11. Dimensiones del cilindro Proctor.

Carga aplicada = 4030 Kg

$$\text{Área} = \frac{V}{h} = \frac{2125}{11,62} = 182,87 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esfuerzo desarrollado} = \frac{P}{A} = \frac{4030}{182,87} = 22,04 \text{ Kg/cm}^2$$

Corrección por esbeltez = esfuerzo desarrollado x 0.77 =

$$= 22,04 \times 0.77 = \mathbf{16,97 \text{ Kg/cm}^2}$$

El esfuerzo desarrollado con el 6% de cemento incorporado es de 16,97 Kg/cm².



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
INGENIERÍA CIVIL
RESISTENCIA A LA COMPRESION -- NORMA AASHTO T22

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

SECTOR : QUITO - SUR

FECHA : 14/06/2013

USO : SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO

ELABORADO: D.C.P

Nº	% DE CEMENTO	FECHA DE FUNDICION	FECHA DE ROTURA	EDAD DIAS	CARGA Kg.	AREA cm ²	FACTOR DE ESBELTEZ	RESIST. Kg/cm ²
1	6	14-06-13	21-06-13	7	4030	182.9	0.771	17
2	9	14-06-13	21-06-13	7	5180	182.9	0.771	22
3	12	14-06-13	21-06-13	7	7040	182.9	0.771	30
4	15	17-06-13	24-06-13	7	5830	182.9	0.771	25

Tabla Nº 20. Resultado ensayo a compresión probetas de suelo-cemento. Autor

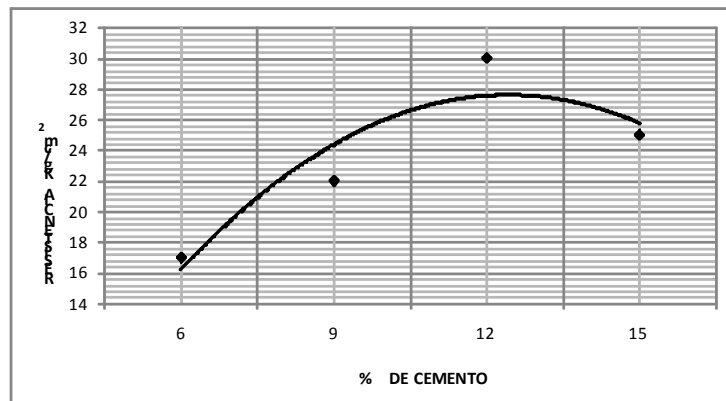


Gráfico Nº 26. Curva Resistencia vs % de cemento. Autor

3.3.7 ELABORACIÓN DE BRIQUETAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

El suelo - emulsión es un producto endurecido resultante de una mezcla íntima compactada de suelo y emulsión asfáltica, en proporciones establecidas a través de una dosificación racional, ejecutada de acuerdo con las normas aplicables al suelo en estudio.

3.3.7.1 DISEÑO DE UN ESTABILIZADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

En un estabilizado suelo-emulsión cada componente cumple una determinada función. El suelo aporta cohesión a la mezcla, por eso es importante controlar los valores de plasticidad. El asfalto, proveniente de la emulsión asfáltica, es el que hace la mezcla insensible al agua.

Mediante ensayos sencillos no solo es posible dosificar correctamente un estabilizado de suelos sino también predecir sus características una vez realizado.

3.3.7.2 DOSIFICACIÓN DE SUELO – EMULSIÓN

Es la secuencia de ensayos realizados con una determinada mezcla de suelo y emulsión, seguida de la interpretación de los resultados por medio de criterios preestablecidos; el resultado final es la fijación de la variable citada, el objetivo de dosificación pasa a ser sólo la fijación de cantidad adecuada de emulsión.

3.3.7.3 PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA LA ESTABILIZACIÓN

La dosificación se la hace experimentalmente: diferentes cantidades de emulsión son usadas en los ensayos y el análisis de resultados indica el porcentaje de emulsión que nos da mejor resultados al estabilizar el suelo sobre el concepto del suelo – emulsión.

La determinación de la adecuada cantidad de emulsión se basa en el hecho de que suelos mezclados con pequeñas cantidades de emulsión, estando debidamente compactados y curados, mejoran sensiblemente sus características originales de resistencia mecánica.

La acción de las cargas y la variación de condiciones climáticas podrían, después de cierto tiempo, disgregar la mezcla endurecida, lo que haría que perdiese el grado de estabilización alcanzado, transformándose en una simple mezcla compactada de suelo con emulsión, de calidad baja e indefinida.

3.3.7.4 ELECCIÓN DE CANTIDAD DE EMULSIÓN PARA EL ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Son ensayadas tres briquetas por cada porcentaje, diferenciando la cantidad emulsión mediante dos puntos porcentuales.

Los porcentajes de emulsión con los que se van a realizar los ensayos son: 4%, 6%, 8%, 10% y 12%

Una manera de fijar las cantidades de emulsión para los ensayos es la comparación del suelo en estudio con otros ya ensayados, llevándose a consideración la granulometría, plasticidad de suelo.

3.3.7.5 MATERIAL Y EQUIPO.

- Muestra de suelo aproximadamente 900gr cada briqueta
- Emulsión CSS – 1H (Proveedor Chova)
- Disco de papel parafinado
- Balanza de precisión de 0.1 gr.
- Equipo misceláneo. (Brochas para limpieza, cepillo, espátulas de 4", charolas de lámina galvanizada, cucharas y cuchilla)
- Probeta precisión (1 ml)
- Moldes para briquetas

- Martillo mecánico Marshall
- Equipo para desmoldar briquetas Marshall



Fotografía N° 32. Equipo para la compactación de briquetas por el método Marshall. Autor



Fotografía N° 33. Equipo utilizado para la extracción de briquetas. Autor

3.3.7.6 PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

El Instituto del Asfalto en su publicación Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, MS N° 19S, sugiere la realización de 3 puntos mínimo para la determinación del porcentaje óptimo de la emulsión.

El procedimiento es el siguiente:

1. Pese en envases adecuado la cantidad de suelo a utilizar para la elaboración de las briquetas,
2. Agregamos la cantidad de agua necesaria y alcanzar el porcentaje óptimo de humedad, haciendo que la mezcla con el agua adicionada se homogénea,
3. Después de humectar la muestra de suelo, echamos la cantidad de emulsión calculada para el peso a compactar y homogenizamos la mezcla,



Fotografía N° 34. Mezcla del suelo con emulsión asfáltica. Autor

3.3.7.7 PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN

1. Colocar el molde y el collar sobre la base del pedestal que forma parte del equipo de compactación Marshall, en el interior poner disco de papel parafinado con las dimensiones del interior del molde, luego colocar la mezcla suelo - emulsión.,



Fotografía N° 35. Colocación del suelo en el molde a compactar. Autor

2. Acomodar el material dentro del molde para su posterior compactación y no falte material para elaborar las briquetas,
3. Colocar el martillo Marshall con una caída libre de 457.2 mm (18.0") sobre el molde, para luego proceder a la compactación, procurando dar de forma constante el número de golpes según sea el diseño. En nuestra investigación el uso va a ser en una vía urbana, por este motivo se someterá a las briquetas a 75 golpes,



Fotografía N° 36. Elaboración de briqueta. Autor

4. Terminada la compactación en la primera cara, invertimos el molde para golpear la cara que no estuvo expuesta,
5. Retire la base, el collar, los discos de papel (si fuera posible, si se compromete la briqueta conservarlo hasta que se pueda sacar sin

dañar la superficie) y coloque el molde, con el espécimen compactado en su interior, sobre un estante perforado en el horno a 60 °C (140 F) durante 48 Horas (Jiménez, 2008),

6. Pasado el tiempo de curado de las briquetas a la temperatura de 60 °C, se procede a sacarlas de los moldes, para esto se deja enfriar el espécimen en el molde durante una hora como mínimo, previamente a su desmolde. Para esto nos ayudamos del equipo apropiado para este objetivo,



Fotografía N° 37. Muestra compactada dentro del molde. Autor



Fotografía N° 38. Curado de briquetas en el horno. Autor

3.3.7.8 ENSAYO DE LAS BRIQUETAS

Con las briquetas compactadas se determinan los valores aproximados de los parámetros volumétricos y de la estabilidad.

Los parámetros volumétricos a menudo no son evaluados; se los calcula sólo como aproximaciones, debido a la posibilidad de que exista humedad en las briquetas compactadas, curadas y al gran número de especímenes necesarios para valores más exactos. Si se desean valores más precisos, debe tenerse en cuenta la humedad existente en los especímenes compactados y la máxima densidad teórica debe ser determinada con una mezcla suelta, libre de humedad.

3.3.7.9 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

La determinación de las propiedades volumétricas se realiza por medio del caso general expuesto para este tipo de mezclas con emulsión asfáltica, esto es utilizando el peso en el aire y el peso sumergido de la muestra para determinar la densidad Bulk.

El procedimiento se detalla así:

1. Se limpia el polvo y material suelto de las briquetas,
2. Pesamos las briquetas en el aire,



Fotografía N° 39. Pesado de briquetas al aire. Autor

3. Luego pesamos las briquetas sumergidas en agua,



Fotografía N° 40. Pesado de briquetas en agua. Autor

4. Con los datos obtenidos hacemos los cálculos pertinentes.

3.3.7.10 ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO

La estabilidad se calcula para cada grupo de briquetas después del curado, sin olvidar que primero ensayaremos un grupo de tres briquetas por porcentaje de emulsión en seco y luego de cuatro días ensayaremos las tres briquetas restantes sometidas a saturación en agua a temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, para simular la influencia de la humedad (SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES;).

La determinación de la Estabilidad Marshall se la obtiene en unidades de libras. Cada equipo tiene una fórmula de estabilidad, debido a que tienen un anillo de compresión con una determinada constante, por esto las medidas obtenidas deben ser corregidas para obtener su equivalencia en unidades aceptadas por normas de cada país. El equipo utilizado consta de un anillo dinamómetro que da el valor de carga en Kilogramos, este valor se debe convertir al final a libras, porque en nuestro país el MTOP sugiere el uso de esta unidad.

El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

Se determina promediando los valores obtenidos en los seis especímenes fabricados.

3.3.7.10.1 EQUIPO

- Prensa Marshall mecánica provista de anillo dinamómetro de 0 a 6000 lbs. Capaz de aplicar una carga a una velocidad constante 50,8 mm (2") por minuto.
- Mordaza de rotura para ensayos de las probetas.
- Medidor de deformación o cualquier otro dispositivo que permite medir la variación de diámetro de los especímenes durante el ensayo de estabilidad (Determinación del Flujo).
- Baño de agua de control termostático para sumergir y calentar probetas que mantenga temperatura a 60 °C.



Fotografía N° 41. Mordaza de rotura. Autor

3.3.7.10.2 PROCEDIMIENTO

1. Se encera los aparatos, se comprueba el funcionamiento del extensómetro del anillo de carga y medidor de deformación de flujo.

2. Se sumergen las briquetas en un baño María a 60 °C por un tiempo entre 30 y 40 minutos.



Fotografía N° 42. Briquetas en baño maría. Autor

3. Se limpian cuidadosamente las superficies interiores las mordazas de rotura y se lubrican con grasa o aceite las varillas de guía hasta que la mordaza superior se deslice libremente
4. Se extrae la briqueta del baño y se seca la superficie.
5. Se coloca la briqueta centrada sobre la mordaza inferior, se ensambla luego la mordaza superior y el conjunto armado se sitúa centrado en la prensa.
6. Se verifica que el extensómetro del anillo de carga instalado en la máquina de compresión marque 0 cuando no se esté aplicando carga. Se ubica el medidor encargado de la medición de flujo sobre la varilla guía marcada y se comprueba que la lectura inicial sea 0.
7. Se aplica la carga a la probeta a velocidad de deformación constante de 50,8 mm (2") por minuto hasta que se produce la rotura. El punto de rotura viene definido por la carga máxima obtenida. La carga necesaria para producir la rotura de la briqueta a 60 °C es el valor de la Estabilidad Marshall.

8. Mientras se está determinando la estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformación en su posición sobre la varilla de guía, cuando llega a la carga máxima se lee y anota la medida. Esta lectura es el valor de deformación, expresada en centésimas de pulgada, conocido como flujo.
9. El proceso desde el momento de sacar la probeta del baño María hasta la rotura de la misma, debe realizarse lo más rápidamente.



Fotografía N° 43. Lecturas iniciales en cero. Autor



Fotografía N° 44. Ensayo Marshall. Autor

3.3.7.10. RESULTADOS OBTENIDOS

La siguiente tabla indica los resultados obtenidos para la determinación de los valores de densidad Bulk y estabilidad:



LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

CÁLCULO DE PROPIEDADES MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO

PROYECTO:
USO :

ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE
SUB-RASANTE

No. GOLPES : 75

PROCEDENCIA :

ELABORADAS EN LABORATORIO

FECHA ENSAYO :

27 DE MAYO DE 2013

Briqueta	% EMULSIÓN	PESO (gramos)			BULK	ESTABILIDAD (Kg)		
		Seca Aire	En Agua	Volumen		Medida	F.C.	Corregida
		d	f	V		q	e	s
				e-f	d/v			
1		799	299	500	1.598	220	2.08	458
2	4.0	676	258	418	1.617	279	1.56	435
3		651	251	400	1.628	219	1.56	342
PROMEDIO					1.614			411
1		579	229	350	1.654	264	1.04	275
2	6.0	652	257	395	1.651	312	1.47	459
3		665	264	401	1.658	392	1.56	612
PROMEDIO					1.654			448
1		638	257	381	1.675	336	1.79	601
2	8.0	683	274	409	1.670	449	1.56	700
3		707	283	424	1.667	315	1.47	463
PROMEDIO					1.671			588
1		764	294	470	1.626	489	1.19	582
2	10.0	750	288	462	1.623	489	1.19	582
3		752	289	463	1.624	399	1.19	475
PROMEDIO					1.624			546
1		731	273	458	1.596	369	1.19	439
2	12.0	722	272	450	1.604	300	1.25	375
3		693	261	432	1.604	294	1.32	388
PROMEDIO					1.602			401

Tabla Nº 12. Resultados del ensayo Marshall. Autor

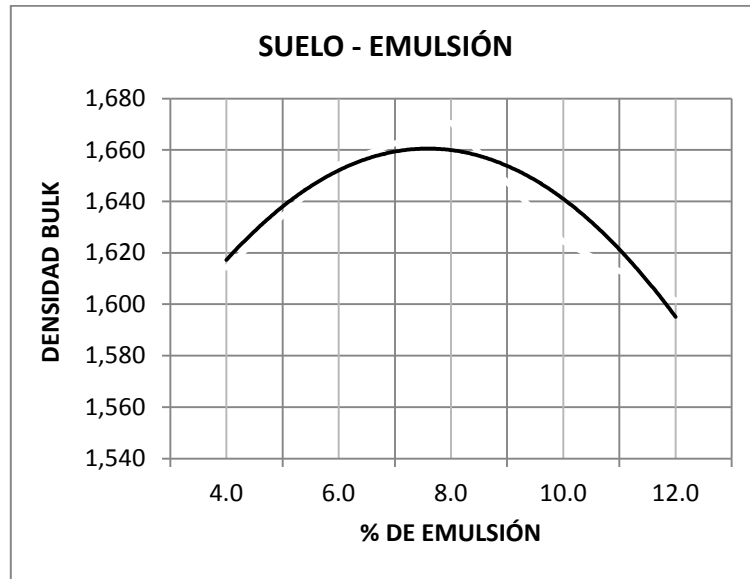


Gráfico N° 25. Curva densidad Bulk vs % de emulsión asfáltica. Autor

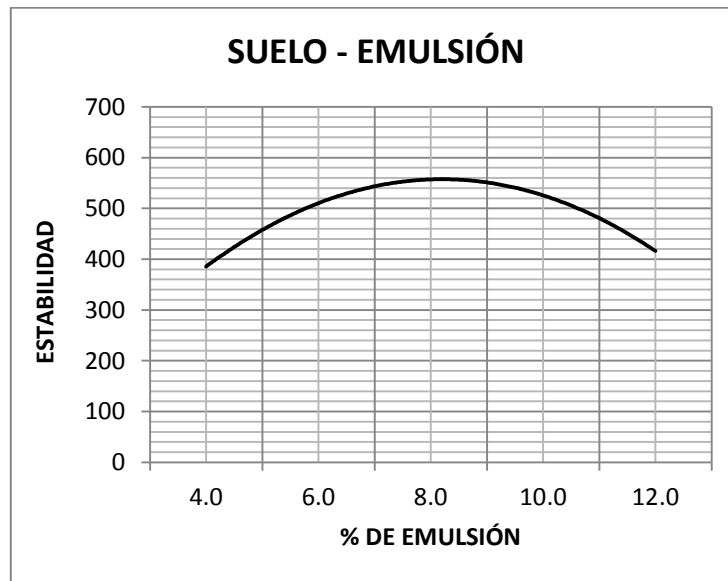


Gráfico N° 26. Curva Estabilidad vs % de emulsión asfáltica. Autor

CONTENIDO OPTIMO DE EMULSIÓN:

BULK :	7.5	%		
ESTABILIDAD :	8.0	%		
PROMEDIO :	7.75	%	→	8.0 %
ASFALTO RESIDUAL :	4.65	%	→	4.8 %

3.3.7.11 CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

El contenido óptimo de asfalto residual es el resultado de realizar el análisis de todos los gráficos propuestos para la emulsión y convertir ese porcentaje óptimo de emulsión a porcentaje de asfalto residual, el porcentaje que existe de asfalto en la emulsión, en este caso 60%.

Existen muchos criterios para evaluar una mezcla asfáltica uno de estos criterios es el de promediar los valores recomendables de las propiedades evaluadas, en este caso particular de la estabilización de materiales se buscará el mínimo porcentaje de emulsión que cumpla un requerimiento.

Este valor óptimo debe ser definido según la mejor combinación de la estabilidad Marshall (seca y saturada), flujo y la densidad Bulk.

Para la determinación del valor óptimo de emulsión existen diferentes criterios según la aplicación, en este caso particular se toma el criterio que el porcentaje óptimo es el mínimo porcentaje que cumple con los requerimientos expuestos de 750 lbs.min de estabilidad y 5 a 18 (1/100") de flujo, que son las condiciones que se deben cumplir en nuestro país para este tipo de estabilizaciones.

Se demostró que existe influencia de la humedad en la Estabilidad de la base, para garantizar nuestro diseño, se tomaran los valores mínimos que garantizan las estabilidades saturadas de 750 lib. min.

La densidad Bulk de la mezcla compactada es un parámetro de comparación no de diseño.

CAPITULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 ENSAYOS DE LÍMITES DE ATTERBERG

Los resultados expuestos:

Límite Líquido = 29.90%

Límite Plástico = 23.31%

Obtenidos los valores del límite plástico y límite líquido se procede a calcular el índice de plasticidad el cual es un parámetro para la aplicación de enzimas orgánicas:

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 29.90 - 23.311 = 6.59$$

4.2 ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUB-RASANTE			
NORMA AASHTO T 88			
TAMIZ	PESO RET. ACUMULADO	% ACUMULADO	% QUE PASA
1/2"	17	4	96
3/8"	19	5	95
Nº. 4	30	8	93
Nº.10	44	11	89
Nº. 40	85	21	79
Nº. 200	191	48	52
Pasa Nº.200	209	52	
TOTAL	400		

PESO ANTES DEL LAVADO : 400

PESO DESPUÉS DEL LAVADO : 191

El análisis granulométrico muestra que el porcentaje que pasa por el tamiz N° 200 es del 52%, hay predominación de suelos finos.

4.2.1 CALCULO DE ÍNDICE DE GRUPO (IG)

Los parámetros para el cálculo del índice de grupo por el método gráfico son el límite líquido, índice de plasticidad y % que pasa por el tamiz N° 200.

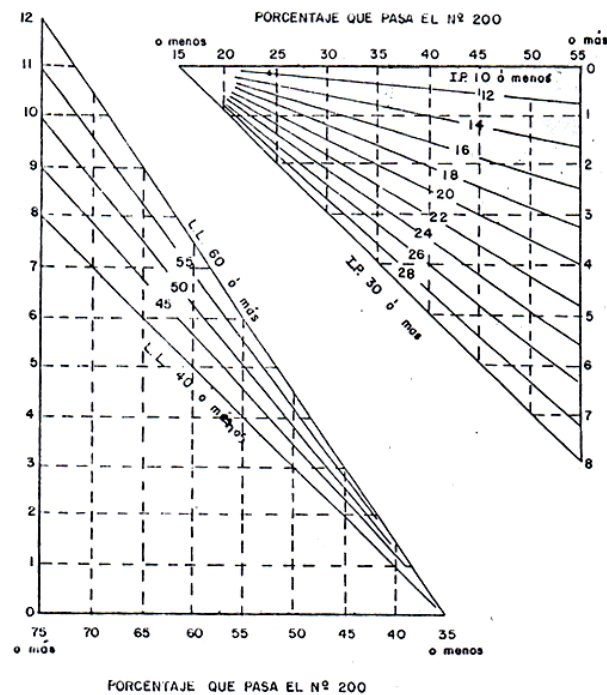


Gráfico N° 27. Método gráfico para el índice de grupo. Bowles, 1982

Resumen de resultados de límites de atterberg y granulometría:

Índice plástico = 6.59

Índice de grupo = 3

% que pasa el tamiz N° 200

Con los datos obtenidos de los ensayos de los límites de atterberg se procede a la clasificación del suelo mediante el sistema planteada por la AASHTO. De la diferencia entre el límite líquido (29.90%) y el límite plástico (23.31%) se obtiene un índice de plasticidad de 6.59 y como del análisis granulométrico se tiene un porcentaje que pasa el tamiz N^o. 200 igual a 52%, obtenemos un índice de grupo de 3, con estos valores al ingresar a la tabla de clasificación AASHTO el suelo queda clasificado como un **suelo A – 4**, lo que corresponde a un suelo limoso.

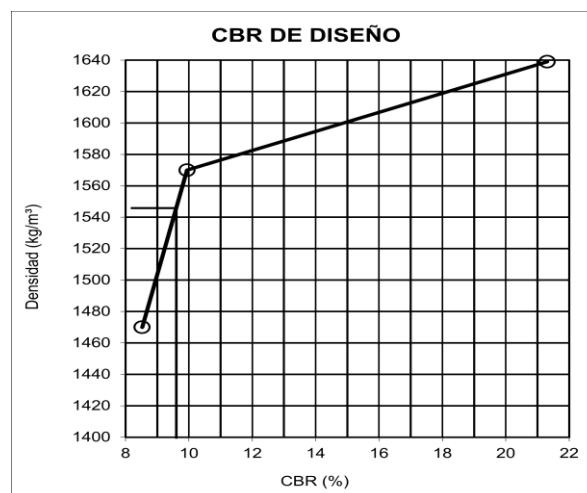
4.3 ENSAYO PROCTOR

Máxima Densidad Seca = 1.629 Kg/m³

Humedad Óptima = 19%

Como se puede observar en la gráfica la densidad máxima que puede alcanzar el suelo es de 1629 Kg/m³ al ser compactado con una humedad óptima de 19 %. Este dato de densidad máxima corresponde al valor con el cual se debe comprobar porcentajes de compactación en los diferentes trabajos de campo que se realicen.

4.4 ENSAYO CBR



CBR AL 95% = 9.5 %

Como se puede ver el CBR del suelo es de 9.5%, este valor nos indica que el suelo tiene una capacidad de soporte baja, con lo cual se ve la necesidad de realizar un mejoramiento de la capacidad portante del suelo.

4.5 COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS CON ENZIMA Y SIN ENZIMA

CBR del suelo con enzima sin curado de la muestra:

CBR AL 95% = 11.2 %

CBR del suelo con enzima con curado de la muestra:

CBR AL 95% = 15.8 %

De los ensayos CBR realizados en el suelo en estudio se puede observar que existe variación en la capacidad de soporte del suelo, por ejemplo en el caso del suelo natural sin ninguna modificación se obtiene un valor CBR de 9.5%, mientras que para el suelo mejorado con enzima se consigue un valor CBR de 15.8 %, lo cual nos está verificando el aumento en capacidad de soporte del suelo en un 66%, lo cual representaría un mejoramiento con respecto al valor inicial.

Debemos hacer notar que el suelo al ser estabilizado con enzima debe someterse a un proceso de curado de 24 horas a una temperatura de 60 °C (temperatura en laboratorio), periodo en el cual la enzima comienza a actuar en el suelo reduciendo de esta forma los volúmenes de vacío presentes en el suelo, logrando de esta manera reducir la permeabilidad del suelo. Si se analiza los resultados obtenidos de CBR tanto en el suelo estabilizado con enzima y sometido al proceso de curado (CBR = 15.8 %) y el suelo sin curar (11.2 %), se ve claramente el efecto que produce el proceso de curado.

4.6 ESTABILIZACIÓN CON OTROS AGENTES (CEMENTO Y EMULSIÓN)

4.6.1 ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

De los resultados expuestos de la estabilización suelo más cemento y como se puede observar en la gráfica la resistencia máxima que puede alcanzar el suelo estabilizado con cemento es de 30 Kg/cm² al ser compactado con una humedad óptima de 19%.

Este valor máximo de resistencia a la compresión del suelo estabilizado se alcanza con el 12% de incremento de cemento con respecto al suelo seco.

De acuerdo a la Tabla N° 22, indica el rango de resistencia que debe alcanzar los suelos estabilizados con cemento a los 7 días de curado de las muestras elaboradas que es de 18 Kg/cm² a 30 Kg/cm². Tomando en cuenta dicho cuadro y considerando los resultados obtenidos se determina que con la aportación del 9% de cemento el suelo estabilizado está dentro del rango de resistencia establecido.

Tipo de suelo	Resistencia a la compresión de especímenes saturados, (Kg/cm ²)	
	7 días	28 días
Suelos de arena y gravas: AASHTO grupos A-1,A-2,A-3 Grupos unificados GW,GC,GP, GM,SW,SC,SP,SM	21 - 42	28 – 70
Suelos limosos AASHTO grupos A-4 y A-5 Grupos unificados ML y CL	18 - 35	21 - 63
Suelos arcillosos AASHTO grupos A-6 y A-7 Grupos unificados MH y CH	14 - 28	18 - 42

Tabla N° 13. Rango de resistencias a compresión sin confinamiento a los 7 y 28 días.
Inecyc

Para la utilización de este material según los resultados obtenidos, se debe estabilizar con el 9% de cemento Portland para mejorar sus características de resistencia y plasticidad.

4.6.2 ESTABILIZACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

Realizados los ensayos, como se indica en las figuras, se determina que la estabilización suelo más emulsión asfáltica alcanza una densidad Bulk máxima de 1,671 gr/cm².

El porcentaje de emulsión asfáltica añadido para alcanzar la densidad máxima es del 7.5% con respecto al suelo seco.

La estabilidad de la muestra llega a un valor de 560 con el 8% de emulsión; es decir, con 4.8% de asfalto residual.

Para la utilización de este material según los resultados obtenidos, se debe estabilizar con el 8% de emulsión asfáltica para mejorar sus características de resistencia y plasticidad.

4.7 DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO

En este punto se realizara el diseño de espesores de pavimento para los diferentes tipo de estabilización de sub-rasante y para el suelo de sub-rasante sin ninguna modificación, el objeto de los diseños es ver cuáles son las diferencias que cual alternativa es más factible técnica y económicamente indistintamente que el tema de tesis sea estabilización de sub-rasantes con el empleo de enzima.

4.7.1 ALTERNATIVAS DE DISEÑO:

- **Diseño del pavimento con material granular.** Este diseño se hará utilizando una capa de material granular sobre la sub-rasante mas la adición de una capa de carpeta asfáltica.
- **Diseño del pavimento con suelo estabilizada con enzima.** En este caso el suelo de sub-rasante se estabilizara un espesor calculado, más la incorporación de material granular y una capa de carpeta asfáltica.
- **Diseño de pavimento con base de suelo estabilizado con emulsión.** En este caso se utilizará el suelo de la sub-rasante para realizar un mejoramiento del suelo con la incorporación de emulsión asfáltica, de esta manera el suelo estabilizado lo usaremos como una base de suelo emulsión colocada sobre la sub-rasante mas la adición de una capa de carpeta asfáltica.
- **Diseño de pavimento con base de suelo cemento.** En este caso el suelo de sub-rasante será mejorado mediante la incorporación de cemento, de esta manera el suelo estabilizado se colocará sobre la sub-rasante mas la incorporación de una capa de carpeta asfáltica.

El diseño se lo realizara bajo las mismas variables de tiempo y tráfico, para las cuatro alternativas. El método aplicado en el diseño del pavimento será el AASHTO 93.

4.7.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO AASHTO DE PAVIMENTOS

La estructura de un pavimento asfáltico está compuesta por un conjunto de capas, cada una de las cuales debe estar concebida, diseñada y construida

de manera que sea capaz de soportar adecuadamente las solicitaciones a las cuales va a estar sometida. El proceso de diseño debe evaluar, idealmente, las solicitaciones a las que está sometida cada una de estas capas; esta evaluación solamente es posible si se emplean modelos mecánicos de análisis

Las variables que se tienen que considerar en este método, serán las siguientes.

4.7.2.1 VARIABLES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Existen dos variables que deben tomarse en cuenta:

- El período de diseño.
- La vida útil del pavimento

El período de diseño: es el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente.

La vida útil del pavimento: es aquel tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad.

4.7.2.2 VARIABLES EN FUNCIÓN DEL TRÁNSITO

Esta variable es el número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN) o Equivalent Axial Load (ESALS)

4.7.2.3 ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad de una estructura de pavimento, es la capacidad que tiene éste de servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado.

Para el diseño de pavimentos debe asumirse la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final; la inicial (P_o) es función directa del diseño de la estructura de pavimento y de la calidad con que se construye la vía, la final o terminal (P_t) va en función de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del diseñador; los valores recomendados por la AASHTO 93 son:

- Serviciabilidad inicial
 - $P_o = 4.5$ para pavimentos rígidos
 - $P_o = 4.2$ para pavimentos flexibles
- Serviciabilidad final
 - $P_t = 2.5$ ó más para caminos principales
 - $P_t = 2.0$ para caminos de tránsito menor

4.7.2.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Considera las propiedades de los materiales, que son las que se valoran para obtener el módulo de resiliencia, ya que en función de éste se llega a los coeficientes de los números estructurales (SN).

El número estructural (SN) para el pavimento flexible, es un parámetro que representa el nivel de carga que va a soportar la estructura del pavimento.

4.7.2.5 DRENAJES

Se estudian estos valores con el método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos, que son los coeficientes de capa, los cuales se ajustan con factores mayores o menores que la unidad para tomar en cuenta el drenaje y el tiempo en que las capas granulares están sometidas a niveles de humedad cerca de la saturación.

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura de pavimento está expuesta a niveles de humedad cercana a la saturación			
	Menos de 1%	1 - 5 %	5 - 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
Buena	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
Regular	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,80
Pobre	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
Deficiente	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Tabla N° 14. Coeficientes de drenaje. AASHTO 93.

Asumiremos un coeficiente de drenaje (m_2) de 1.00, para condiciones buenas de drenaje.

4.7.2.6 NIVEL DE CONFIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR

El nivel de confianza es uno de los parámetros importantes introducidos por la AASHTO al diseño de pavimentos, porque establece un criterio que está relacionado con el desempeño del pavimento frente a las solicitaciones exteriores. La confiabilidad se define como la probabilidad de que el pavimento diseñado se comporte de manera satisfactoria durante toda su vida de proyecto, bajo las solicitaciones de carga e intemperismo, o la probabilidad de que los problemas de deformación y fallas estén por debajo

de los niveles permisibles. Para elegir el valor de este parámetro se considera la importancia del camino, la confiabilidad de la resistencia de cada una de las capas y el tránsito de diseño pronosticado.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Carreteras de primer orden	80 – 99	75 – 95
Carreteras secundarias	80 – 95	75 – 95
Caminos vecinales	50 - 80	50 - 80

Tabla N° 15. Valores del nivel de Confianza (R) de acuerdo al tipo de camino. AASHTO 93

La esquematización del comportamiento real del pavimento y la curva de diseño propuesta por la AASHTO tienen la misma forma pero no coinciden. La falta de coincidencia se debe a los errores asociados a la ecuación de comportamiento propuesta y a la dispersión de la información utilizada en el dimensionamiento del pavimento. Por esta razón la AASHTO adoptó un enfoque regresional para ajustar estas dos curvas. De esta forma los errores se representan mediante una desviación estándar S_o , para compatibilizar los dos comportamientos. El factor de ajuste entre las dos curvas se define como el producto de la desviación normal Z_r , por la desviación estándar S_o .

Los factores de desviación normal Z_r se muestran en la Tabla de la siguiente página \Rightarrow

VALORES DE Zr EN FUNCIÓN DE LA CONFIABILIDAD R			
Confiabilidad R (%)	Desviación normal estándar Zr	Confiabilidad R (%)	Desviación normal estándar Zr
50	- 0.000	93	-1.476
60	- 0.253	94	-1.555
70	- 0.524	95	-1.645
75	- 0.674	96	-1.751
80	- 0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

Tabla Nº 16. Valores de Zr en función de la confiabilidad R. AASHTO, 1993.

Si la construcción se va a realizar por etapas, la vida útil ha de ser menor al periodo de análisis (vida útil < periodo de análisis), en este caso se deben considerar las confiabilidades de todo el periodo de diseño, de donde resulta que:

$$R_{etapa} = (R_{total})^{1/n}$$

Ecuación Nº 6. Confiabilidad por etapa. Autor

n = número de etapas previstas

Una vez elegido un nivel de confianza y obtenidos los resultados del diseño, éstos deberán ser corregidos por dos tipos de incertidumbre: la confiabilidad de los parámetros de entrada, y de las propias ecuaciones de diseño basadas en los tramos de prueba. Para este fin, se considera un factor de corrección que representa la desviación estándar, de manera reducida y

simple, este factor evalúa los datos dispersos que configuran la curva real de comportamiento del pavimento. El rango de desviación estándar sugerido por AASHTO se encuentra entre los siguientes valores:

- Para pavimentos flexibles: 0.40 – 0.50
- En construcción nueva: 0.35 – 0.40
- En sobre- capas: 0.50

4.7.3 TRÁFICO DIARIO INICIAL Y TRÁFICO FUTURO

4.7.3.1 TRAFICO DIARIO INICIAL (TDI)

El diseño se realizará considerando que tenemos un tráfico promedio diario inicial de 100 vehículos por día de los cuales el 60 % son vehículos livianos (automóviles, camionetas) y el 40 % restante son vehículos pesados (buses, camiones, mixtos, tanqueros, etc.).

4.7.3.2 TRAFICO FUTURO (TF)

La proyección del tráfico futuro, deberá basarse no solamente en los volúmenes normales actuales, sino también en los incrementos del tránsito que se espera utilicen la vía a futuro. La determinación del tráfico futuro se realiza aplicando la fórmula de interés compuesto y aplicando tasas de crecimiento anual, para el tráfico liviano se usará una tasa de crecimiento de 4,7% y para el tráfico pesado una tasa de crecimiento del 6% que son tasas de crecimiento en la ciudad de Quito según la EPMMOP-Q.

$$TF=TDI*(1+i)^n$$

Ecuación Nº 7. Cálculo del tráfico futuro.

Donde:

TF = Tráfico futuro

TDI = Tráfico diario inicial

i = Tasa de crecimiento anual

n = Periodo de diseño

4.7.3.3 PERIODO DE DISEÑO

En este caso por considerarse un camino vecinal y son soluciones a corto plazo se tomara un periodo de diseño corto de 10 años, considerándose que transcurrido los 10 años, deberán hacerse intervenciones acordes según el crecimiento vehicular.

4.7.3.4 EJEMPLO DE CÁLCULO DE TRÁFICO FUTURO

Datos:

N = 10 AÑOS

TDI = 100 Veh. /día

Porcentaje de vehículos livianos = 60%

Porcentaje de vehículos pesados = 40%

Tasa de crecimiento para vehículos livianos = 4.7%

Tasa de crecimiento para vehículos pesados = 6.0%

Solución:

TDI (vehículos livianos) = $100 \cdot 0.60 = 60$ Veh./día.

TDI (vehículos pesados) = $100 \cdot 0.40 = 40$ Veh./día.

Proyección estimada:

$$TF = TDI \cdot (1+i)^n$$

TF (Vehículos livianos) = $60 \cdot (1+0.047)^{10} = 95$ veh/día.

TF (Vehículos pesados) = $40 \cdot (1+0.060)^{10} = 72$ veh/día.

4.7.3.5 RESUMEN DE RESULTADOS:

DATOS	TRAFICO FUTURO	
	LIVIANOS	PESADOS
i (%)	4,7	6,0
n (años)	10	10
TDI	60	40
TF	95	72
TF (10 años)	167	

Tabla Nº 17. Resumen de proyecciones de tráfico para 10 años. Autor

4.7.4 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE EJES EQUIVALENTES

Un requisito de este método de diseño es convertir el tráfico en un número de ejes simples equivalentes a 18000 libras (80 KN) que debe soportar el pavimento durante el periodo de diseño (10 años).

Con este objeto es necesario determinar un factor de transformación que a su vez será la suma de los diferentes coeficientes o factores parciales correspondientes a cada tipo de vehículos pesados o cargas por ejes simples o ejes Tandem (grupos de dos o más ejes próximos). Esta determinación se realiza únicamente con los vehículos pesados, no se toma en cuenta los livianos.

Distribución promedio de vehículos pesados		
Vehículo Tipo	N. de vehículos	Porcentaje
Buses	24	60%
Mixtos	13	32%
Camiones	2	5%
C. 3 ejes o más	1	2%
Tanqueros	0	1%

Tabla N° 18. Distribución promedio de vehículos pesados. Autor

4.7.4.1 METODOLOGÍA EMPLEADA.

Asumiendo un número estructural ($NE = 4$) y un índice de servicio de 2 (para camino vecinal) se entra en el abaco del Gráfico N° 38 propuesto por la AASHTO 93, obteniendo para cada tipo de vehículos el número de ejes equivalentes de 18000 libras por vehículos.

En la siguiente página se muestra el gráfico N° 38. 

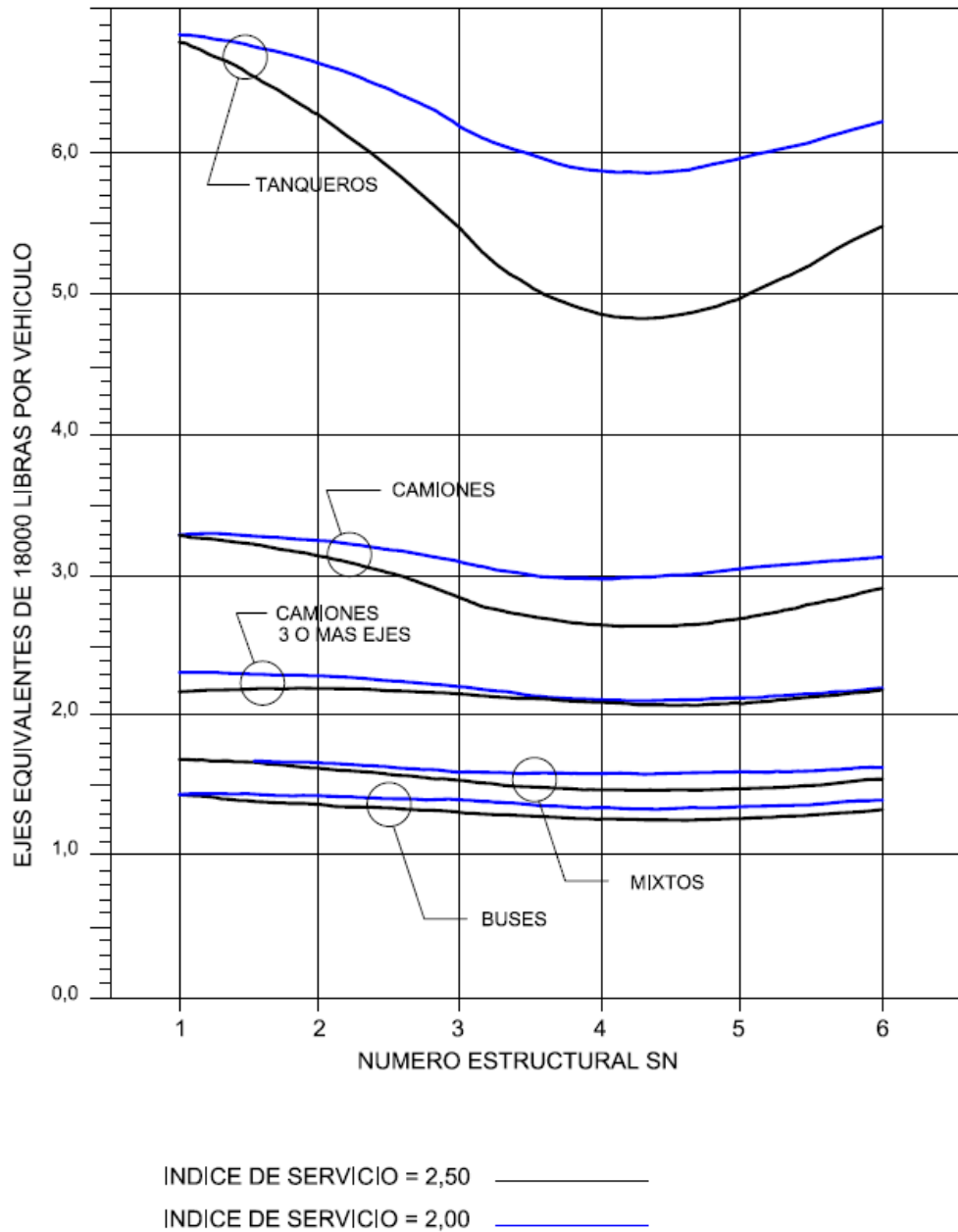


Gráfico N° 28. Promedio de Factores de Carga Equivalente. AASHO, 1993

Se multiplica este número por su respectivo porcentaje, y la suma de estos productos parciales nos da el factor de carga equivalente incluido el número promedio de ejes para todo el tráfico pesado.

FACTOR DE CARGA					
Vehículo Tipo	N. de vehículos	Total V. Pesados	Porcentaje	Nº de ejes equivalentes	F. De carga equivalente parcial
Buses	24	40	60%	1,30	0,780
Mixtos	13		32%	1,60	0,512
Camiones	2		5%	2,95	0,148
C. 3 ejes o más	1		2%	2,10	0,042
Tanqueros	0		1%	5,80	0,058
F. de carga equivalente incluido N° de ejes prom.					1,540

Tabla N° 19. Factor de carga equivalente. Autor.

El total de ejes equivalentes se encuentra entonces multiplicando: el número promedio de vehículos pesados por día durante el periodo de diseño, por el número total de días, por el factor de carga equivalente y por 0.60, este último representa el 60% del tráfico para el carril de diseño.

$$\text{Número de ejes equivalentes} = \frac{\text{TDI} + \text{TF}}{2} * 365 * n * \text{FCE} * \% \text{TCD}$$

Ecuación N° 8. Número de ejes equivalentes. AASHTO

Donde:

TDI = Tráfico Diario Inicial.

TF = Tráfico Futuro para el Periodo de diseño

FCE = Factor de Carga Equivalente (1.54)

%TCD = Porcentaje de Tráfico para el carril de diseño (60%)

n = periodo de diseño (10 años)

Ejemplo de cálculo:

Datos:

TDI (pesado) = 40 vehículos.

T. Futuro (pesado) = 72 al cabo de 10 años

Periodo de 10 años:

$$\text{Número de ejes equivalentes} = \frac{40+72}{2} * 365 * 10 * 1.540 * 0,60$$

$$\text{Número de ejes equivalentes} = 188866$$

Para el diseño se tomará como número de ejes equivalentes de 200000, con lo cual incrementaremos el margen de seguridad.

PERIODO (Años)	TPDA inicial (Veh)	T.FUTURO	F.DE CARGA	F. DE INGRESO	NUMERO DE EJES EQUIVALENTES
10	40	72	1,54	0,60	188866
Nº DE EJES EQUIVALENTES PARA 10 AÑOS					188866
Nº DE EJES EQUIVALENTES ADOPTADO PARA 10 AÑOS					200000

Tabla Nº 20. Número de ejes equivalentes. Autor

4.7.4.1 MÓDULO DE RESILIENCIA.

En el método de la AASHTO (1986 y 1993), el módulo resiliente reemplaza al CBR como variable para caracterizar la sub-rasante, sub-base y base. El módulo resiliente es una medida de la propiedad elástica de los suelos que reconoce a su vez las características no lineales de su comportamiento. El módulo resiliente puede ser usado directamente para el diseño de pavimentos flexibles, pero también puede ser convertido a un módulo de reacción de la sub-rasante (valor de k) para el diseño de pavimentos rígidos.

El módulo resiliente de la sub-rasante se determina mediante las siguientes expresiones:

1) $M_r \text{ psi} = 1500 \cdot \text{CBR}$; Cuando el $\text{CBR} < 7.2 \%$

2) $M_r \text{ psi} = 3000 \cdot \text{CBR}^{0.65}$; Cuando el $\text{CBR} < 20\%$

3) $M_r \text{ psi} = 4326 \cdot \ln \text{CBR} + 241$; Cuando el $\text{CBR} > 20 \%$

Para el ejemplo tenemos un CBR de 9.5 %, entonces aplicando la ecuación 2 tenemos:

$$M_r \text{ psi} = 3000 \cdot (9.5)^{0.65} = 12961 \text{ psi}$$

4.7.4.2 CÁLCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)

El procedimiento de diseño según el método AASHTO, se basa en un número estructural que representa la resistencia estructural de un pavimento con relación a los otros factores como son: valor soporte del suelo (CBR), carga total equivalente a ejes simples de 18 kips (W18) e índice de servicio (P_o y P_t).

Datos:

$$W18 = 0.20 \cdot 10^6$$

$$\text{Confiabilidad } R = 95\%$$

$$S_o = 0.45$$

$$M_r = 12961 \text{ psi}$$

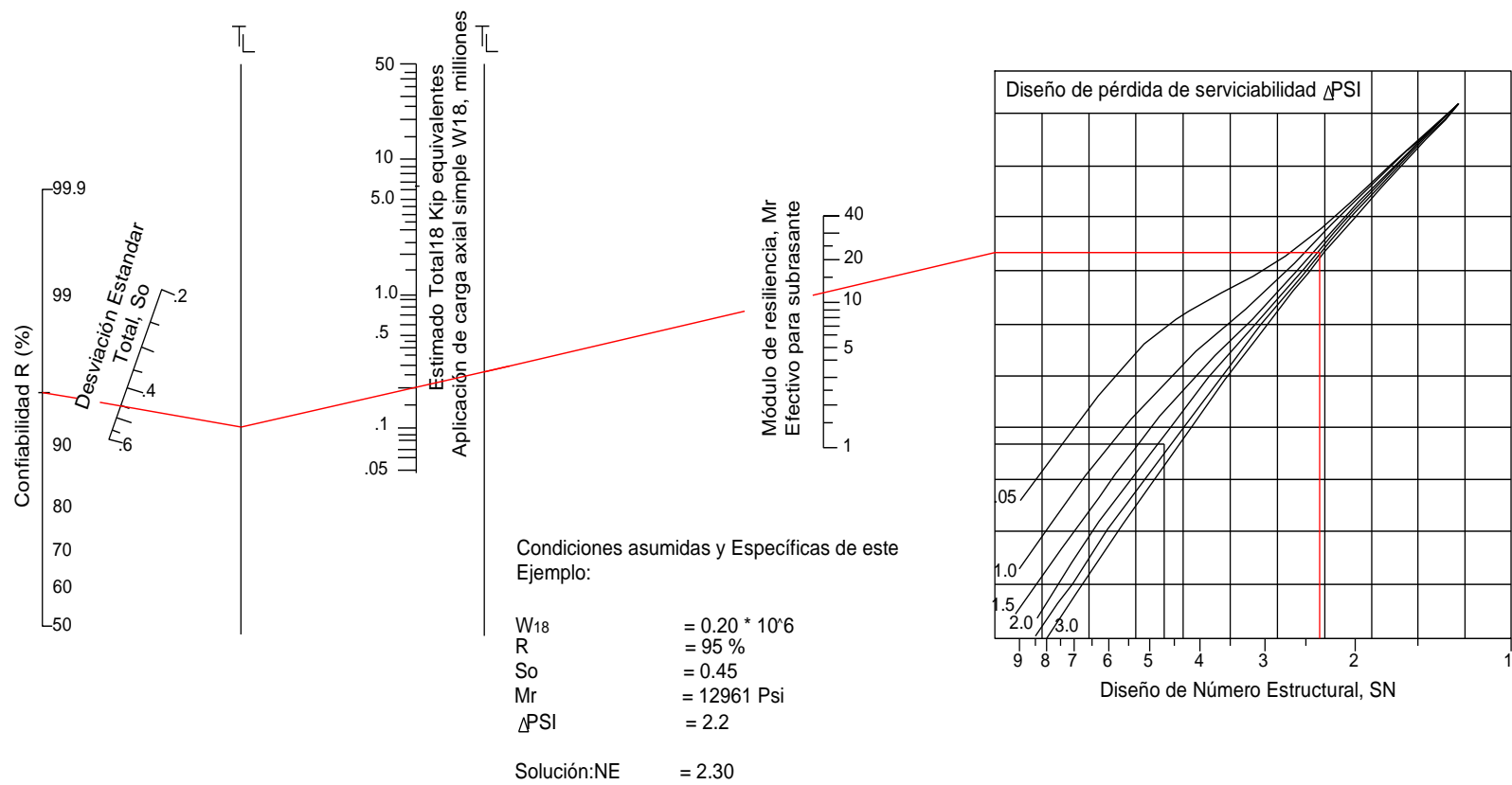
$$P_o = 2.0$$

$$P_t = 4.2$$

$$\Delta PSI = 4.2 - 2.0 = 2.20$$

Con los datos se ingresa en el ábaco del Gráfico N° 40 propuesto por la AASHTO 93, para el cálculo del número estructural (ver ejemplo el Gráfico N°40) o con el programa “CÁLCULO DE LAS ECUACIONES AASHTO 1993. Vásquez, 2004” (ver Gráfico N° 30) y se determina el número estructural requerido para el diseño, obteniéndose un valor de SN (para 10 años) = 2.30.

En la siguiente página se muestra el Gráfico N° 40 con el proceso de cálculo del número estructural. 



**Gráfico N° 29. Abaco para el cálculo del número estructural.
 Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1993**

CÁLCULO DE LAS ECUACIONES AASHTO 1993 (2.0)

Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2004.

Tipo de Pavimento
 Pavimento flexible Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 95 % Zr=-1.645 So 0.45

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 4.2 PSI final 2.0

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr 12961 psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
 Calcular SN **W18 =** 200000
 Calcular W18

Número Estructural
SN = 2.26

Observaciones

Gráfico N° 30. Cálculo del número estructural para un Módulo resiliente de 12691 psi. Cálculo de las ecuaciones Aashto 1993. Vásquez, 2004.

4.7.4.3 DETERMINACIÓN DE ESPESORES.

Una vez calculada la capacidad requerida del pavimento en términos de su número estructural (SN), se deben definir los espesores de las diferentes capas del pavimento, de manera que el conjunto estructural aporte la capacidad total requerida. La capacidad del conjunto de capas del pavimento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$$

Dónde:

a_1 , a_2 , a_3 : Coeficientes estructurales de las capas asfálticas, base y subbase, respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 : Espesores de las capas asfálticas, base y subbase, respectivamente.

m_2 , m_3 : Coeficientes de drenaje de las capas granulares de base y subbase, respectivamente.

Para determinar los coeficientes estructurales se utilizará la Tabla N° 28, misma que está en función del tipo y calidad de material empleado.

COEFICIENTES DE CAPAS		
Clase de material	Normas	Coefficiente (cm)
Capa de superficie		
Concreto asfáltico	Estabilidad de Marshall 1000 - 1800 lbs.	0,134 - 0,173
Arena asfáltica	Estabilidad de Marshall 500 - 800 lbs.	0,070 - 0,118
Carpeta bituminosa mezclada en el camino	Estabilidad de Marshall 300 - 600 lbs.	0,059 - 0,098
Capa de base		
Agregados triturados, graduados uniformemente	P.I. 0 - 4, CBR > 100%	0,047 - 0,055
Grava graduada uniformemente	P.I. 0 - 4, CBR 30 - 80%	0,028 - 0,051
Concreto asfáltico	Estabilidad de Marshall 1000 - 1600 lbs.	0,098 - 0,138
Arena asfáltica	Estabilidad de Marshall 500 - 800 lbs.	0,059 - 0,098
Agregado grueso estabilizado con cemento	Resistencia a la compresión 28 - 46 Kg/cm ²	0,079 - 0,138
Agregado grueso estabilizado con cal	Resistencia a la compresión 7 Kg/cm ²	0,059 - 0,118
Suelo - cemento	Resistencia a la compresión 18 - 32 Kg/cm ²	0,047 - 0,079
Capa de subbase		
Arena - grava, graduada uniformemente	P.I. 0 - 6, CBR 30 + %	0,035 - 0,043
Suelo - cemento	Resistencia a la compresión 18 - 32 Kg/cm ²	0,059 - 0,071
Suelo - cal	Resistencia a la compresión 5 Kg/cm ²	0,059 - 0,071
Mejoramiento de subrazante		
Arena osuelo seleccionado	P.I. 0 - 10	0,020 - 0,035
Suelo con cal	3% mínimo de cal en peso de los suelos	0,028 - 0,035
Tratamiento superficial bituminoso		
Triple riego		* 0,40
Doble riego		* 0,25
Simple riego		* 0,15
	* Usar estos valores para los diferentes tipos de tratamientos bituminosos, sin calcular espesores.	

Tabla N° 21. Coeficientes de capas para diseño estructural de pavimentos flexibles. AASHTO, 1993

Espesor mínimo (pulg.)		
Tráfico ESAL	Concreto asfáltico (D1)	Base (D2)
Menos de 50000	1,0 o tratamiento superficial	4,0
50001 a 150000	2,0	4,0
150001 a 500000	2,5	4,0
500001 a 2000000	3,0	6,0
2000001 a 7000000	3,5	6,0
Mayor a 7000000	4,0	6,0

**Tabla Nº 22. Espesores mínimos para diseño de pavimentos flexibles.
HARRIS, J. (2007)**

4.7.5 DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO BAJO CONDICIONES NATURALES DE SUB-RASANTE:

Para cubrir el número estructural requerido se usará una capa de base de grava graduada (CBR de 80%) colocada sobre la sub-rasante mas la incorporación de una capa de concreto asfáltico.

Datos:

Coefficiente estructural de concreto asfáltico; $a_1 = 0.173$ (ver Tabla Nº 29)

Coefficiente estructural para base (grava, CBR =80%); $a_2 = 0.05$ (ver Tabla Nº 29)

Coefficiente de drenaje ($m_2 = 1.0$) (ver Tabla Nº 22)

SN (requerido) = 2.30

Desarrollo:

Aplicando la ecuación: $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2$

Adoptando un espesor de carpeta asfáltica de 7.5 cm, nos queda la siguiente igualdad:

$$2.30 = 0.173*7.5 + 0.05*D_2*1.0$$

Despejando D_2 tenemos:

$$D_2 = \frac{2.30 - (0.173*7.5)}{(0.05*1.0)} = 20.05 \text{ cm}$$

D_2 asumido = 22.5 cm

El espesor de pavimento queda de 7.5 cm de carpeta asfáltica con un espesor de base de grava de 22.5 cm.

Comprobación de Diseño

$$SN(\text{requerido}) \leq SN(\text{diseño})$$

$$2.30 \leq 0.173*7.5 + (22.5*0.05)$$

$2.30 \leq 2.42$; "OK, cumple condición estructural para diseño"

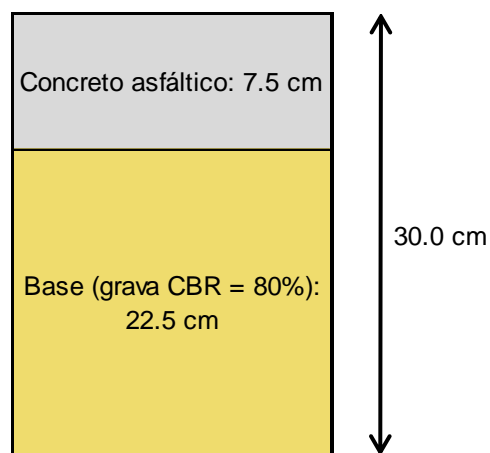


Gráfico Nº 31. Espesor de pavimento con base granular. Autor

4.7.6 DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO CON SUELO ESTABILIZADA CON ENZIMA (SUB-RASANTE MEJORADA).

El procedimiento para determinar el espesor de la capa de mejoramiento según el método AASHTO 1993 consiste en lo siguiente:

Conocido el CBR del material que va a colocarse como sub-rasante mejorada y con el valor de CBR de la sub-rasante se entra en el ábaco del Gráfico N° 39 propuesto por la AASHTO 93, que correlaciona los valores CBR del suelo natural y el estabilizado con enzima obteniendo el coeficiente estructural del material de mejoramiento. Así si queremos mejorar el material de la sub-rasante CBR = 9,5 con un material de CBR = 15 entrando en el ábaco del Gráfico N° 39, encontramos un coeficiente estructural de 0,041.

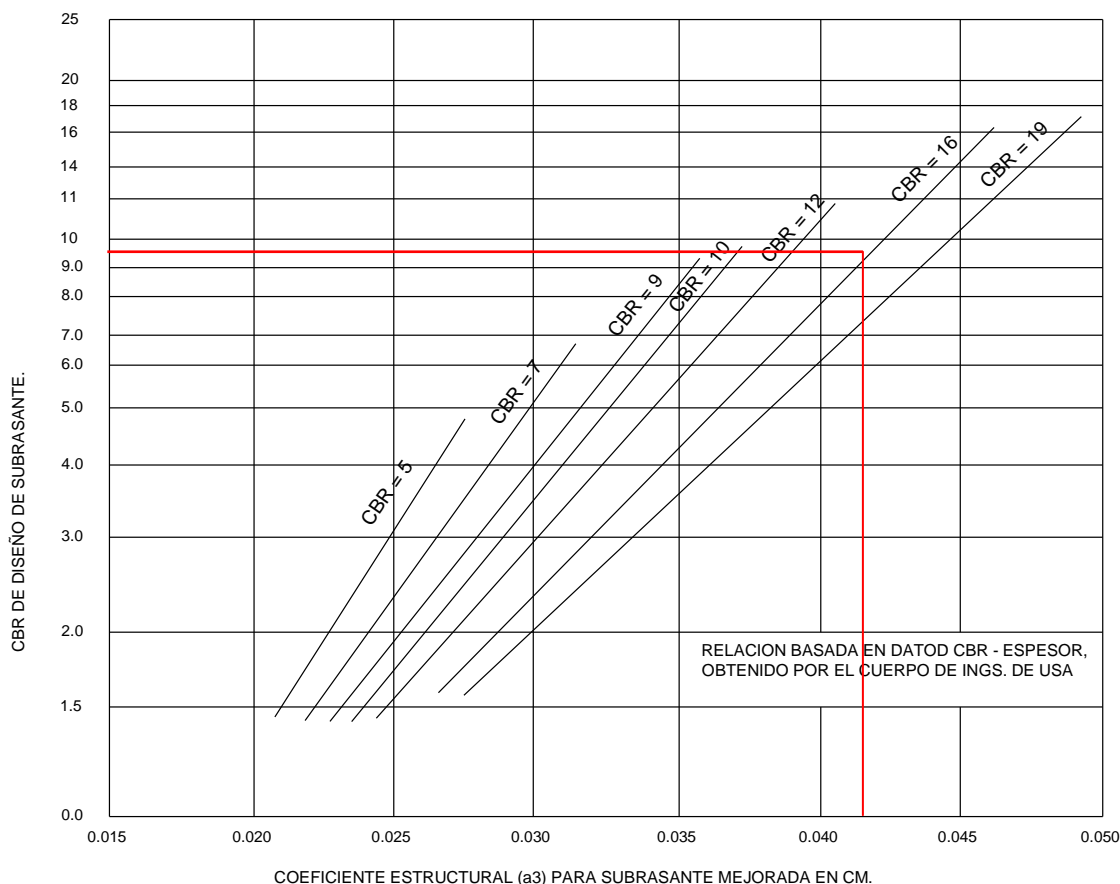


Gráfico N° 32. Correlación entre CBR de Diseño y Coeficiente Estructural Equivalente para Sub-rasante Mejorada. AASHTO, 1993

Con el valor CBR = 15% determinamos mediante el ábaco del Gráfico N° 40 el número estructural corregido SN, este valor nos da 2,03. Luego se establece las diferencias de SN con respecto a los correspondientes a CBR = 9,5%.

Desarrollo:

Cálculo del Módulo resiliente para CBR de 15,0 %, aplicamos la ecuación:

$$Mr \text{ psi} = 3000 * CBR^{0.65}$$

$$Mr \text{ psi} = 3000 * (15)^{0.65} = 17441 \text{ psi}$$

Cálculo del número estructural requerido:

Datos:

$$W18 = 0.20 * 10^6$$

$$\text{Confiabilidad } R = 95\%$$

$$So = 0.45$$

$$Mr = 17441 \text{ psi}$$

$$Po = 2.0$$

$$Pt = 4.2$$

$$\Delta PSI = 4.2 - 2.0 = 2.20$$

4.7.6.1 CÁLCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL.

Para determinar el número estructural utilizaremos el programa elaborado por el Ing. Ricardo Vásquez, obteniéndose un valor de 2.03 (ver Gráfico N° 32).

CÁLCULO DE LAS ECUACIONES AASHTO 1993 (2.0)

Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2004.

Tipo de Pavimento
 Pavimento flexible Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 95 % $Z_r = -1.645$ $S_o = 0.45$

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial PSI final

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)

Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
 Calcular SN $W_{18} =$
 Calcular W18

Número Estructural
 SN =

Observaciones

Gráfico N° 33. Cálculo de número estructural para un Módulo resiliente de 17441psi. Vásquez 2004

Diferencias de número estructural SN con respecto a los correspondientes entre CBR = 9.5 % y CBR = 15 %

$$SN_{CBR=9.5} = 2.30$$

$$SN_{CBR=15} = 2.03$$

$$SN_{CBR=9.5} - SN_{CBR=15} = 2.30 - 2.03$$

$$SN_{CBR=9.5} - SN_{CBR=15} = 0.27$$

El número estructural correspondiente a la capa de sub-rasante mejorada es entonces $SN = 0.27$, con lo cual se plantea la siguiente ecuación:

$$SN = a_3 * D_3$$

$$0.27 = 0.041 * D_3$$

$$D_3 = \frac{0.27}{0.041} = 6.58 \text{ cm}$$

D_3 asumido = 10.0 cm

La igualdad a plantearse para la alternativa de diseño sería entonces:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Reemplazando valores tenemos:

$$2.30 = 0.173 * 7.5 + 0.05 * 1.0 * D_2 + 0.041 * 1.0 * 10.0$$

$$D_2 = \frac{2.30 - 0.173 * 7.5 - (0.041 * 1.0 * 10.0)}{0.05 * 1.0}$$

$$D_2 = \frac{2.30 - 0.173 * 7.5 - (0.041 * 1.0 * 10.0)}{0.05 * 1.0}$$

$$D_2 = 11.9 \text{ cm}$$

$$D_2(\text{asumido}) = 12.5 \text{ cm}$$

El diseño quedaría:

Carpeta de hormigón asfáltico = 7.5 cm

Base (CBR = 80%) = 12.5 cm

Capa de mejoramiento (CBR = 15.0%) = 10.0 cm

Comprobación de diseño

$$SN(\text{requerido}) \leq SN(\text{diseño})$$

$$2,30 \leq 0,173 \cdot 7,5 + 12,5 \cdot 0,05 + (10,0 \cdot 0,041)$$

2.30 ≤ 2.33; “OK, cumple condición estructural para diseño”

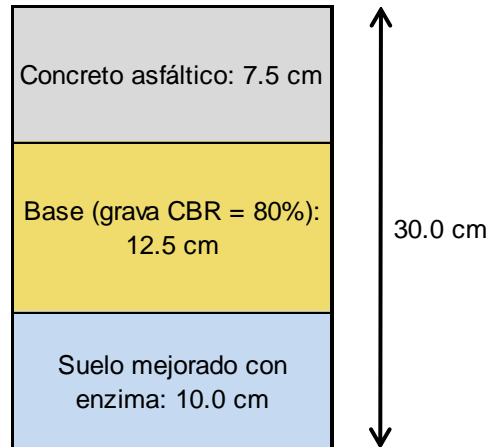


Gráfico N° 34. Espesor de pavimento estabilizado con enzima. Autor

4.7.7 DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTO CON BASE DE SUELO EMULSIÓN.

Este trabajo consistirá en la construcción de una capa de suelo estabilizada con emulsión asfáltica, a fin de conseguir un mejoramiento de las características resistentes del suelo, y disminución de la permeabilidad, que permitan proveer al camino de una superficie uniforme y resistente para circulación vehicular de baja intensidad.

Para la determinación del Coeficiente Estructural de la Capa de Rodadura (a_1) se aplicará una mezcla de concreto asfáltico de estabilidad Marshall de 1800 lb., utilizando la Tabla N° 29 se obtiene un coeficiente estructural $a_1 = 0,173$ (valor en cm).

Para la determinación del Coeficiente Estructural de la Capa de Base Estabilizada (a_2) se conoce el valor de Estabilidad Marshall de diseño para el suelo estabilizado con emulsión (588 Kg o 1296 lb.). Para el

diseño se tomará una estabilidad de 1200 lb y se ingresa al ábaco del Gráfico N° 35, obteniéndose un coeficiente estructural $a_2 = 0.24$ (en pulgadas) o 0.094 (en cm)

El objeto de la estabilización de la sub-rasante es utilizar el suelo de sub-rasante, por lo tanto los diseños se realizaran mejorando el suelo de la sub-rasante y sobre este mejoramiento se coloca una capa de cemento asfáltico, de esta manera la ecuación nos queda:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2$$

Datos:

Coeficiente estructural de concreto asfáltico ($a_1 = 0.173$)

Coeficiente estructural de la base suelo emulsión; $a_2 = 0.094$ (en cm.)

Coeficiente de drenaje ($m_2 = 1.0$)

SN (requerido) = 2.30

Desarrollo

Adoptando un espesor de carpeta asfáltica de 7.5cm, nos queda la siguiente igualdad:

$$2.30 = 0.173 * 7.5 + 0.094 * D_2 * 1.0$$

Despejando D_2 tenemos:

$$D_2 = \frac{2.30 - (0.173 * 7.5)}{(0.094 * 1.0)} = 10.6 \text{ cm}$$

D_2 asumido = 12.5 cm

El espesor de pavimento queda de 7.5 cm de carpeta asfáltica con un espesor de base suelo emulsión de 12.5 cm.

Comprobación de diseño

$SN(\text{requerido}) \leq SN(\text{diseño})$

$2.30 \leq 0.173 \cdot 7.5 + (12.5 \cdot 0.094)$

$2.30 \leq 2.47$; "OK, cumple condición estructural para diseño"

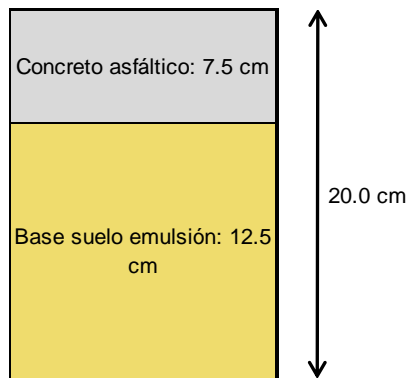
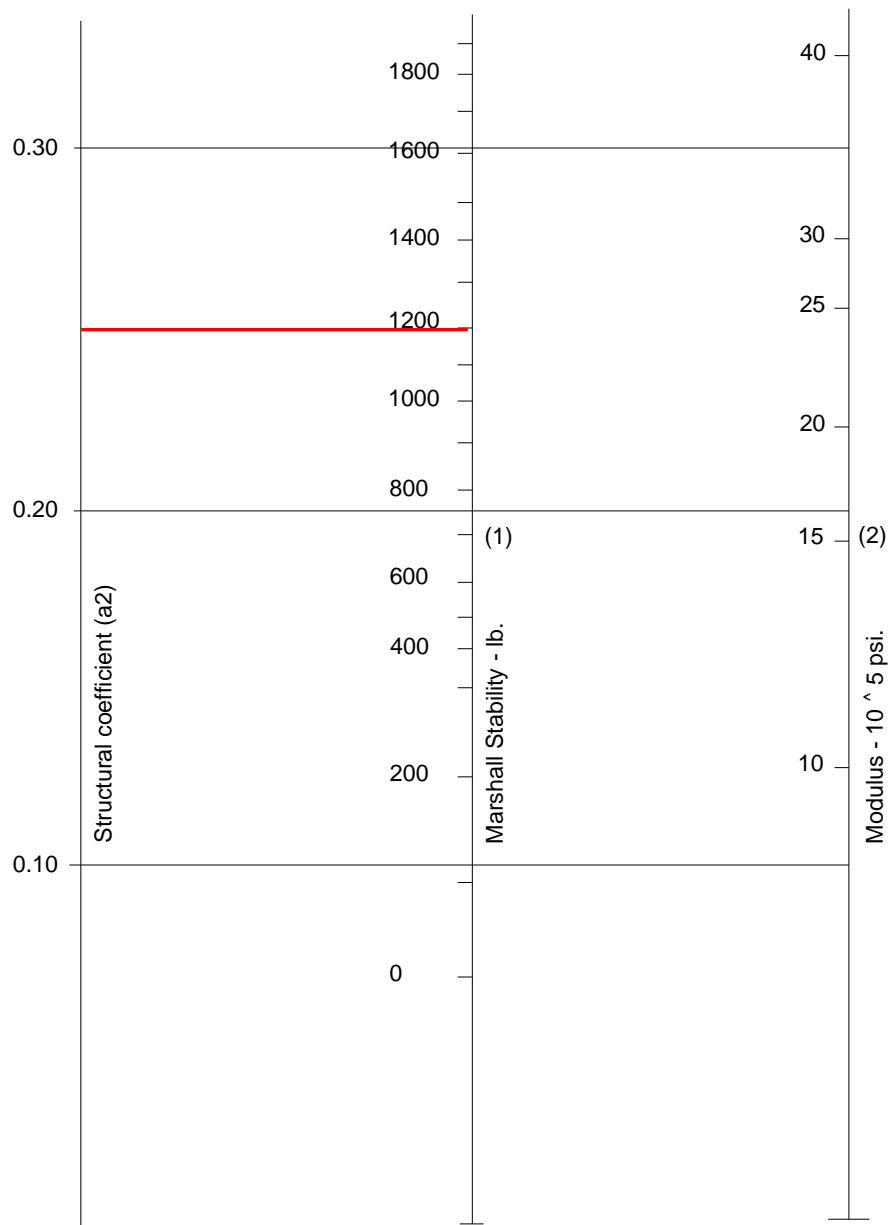


Gráfico N° 35. Espesor de pavimento con suelo estabilizado con emulsión. Autor



(1) Scale derived by correlation obtained from Illinois

(2) Scale derived on NCHRP project (3)

Gráfico N° 36. Variación de coeficientes estructurales para mezclas de bases AASHTO 93

4.7.8 DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTO CON BASE DE SUELO CEMENTO.

4.7.8.1 MÉTODO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)

El método de diseño de espesores que se utiliza es el desarrollado por la Portland Cement Association (PCA), está fundamentada en el principio de que el suelo cemento es un material con propiedades diferentes a cualquier otro y en algunas consideraciones teóricas ajustadas con base en ensayos sobre pavimentos existentes.

Este método aplica el uso de ábacos para diseño de espesores en suelo cemento grueso granular y suelo cemento fino, en nuestro ejemplo utilizaremos el ábaco de diseño para suelo cemento fino en vista que el suelo en estudio corresponde a un suelo A-4; además se necesita conocer el número de repeticiones que circularán por la vía, el módulo de reacción (k) de la sub-rasante, este módulo se determina en función del dato de CBR obtenido mediante el ensayo de laboratorio y aplicando las ecuaciones propuestas por el Ing. Mauricio Torres Salgado.

1) $k=2,55+ 52,5*\log(\text{CBR})$; Cuando el $\text{CBR} \leq 10 \%$

2) $k=46+ 9,08*\log(\text{CBR})^{4,34}$; Cuando el $\text{CBR} > 10 \%$

Como el valor CBR del suelo es de 9.5 se aplicara la ecuación 1. Para cuando el valor de $\text{CBR} \leq 10 \%$.

$$k = \frac{2.55 + (52.5 * \log(9.5))}{10}$$

$$k = 5,39 \text{ Kg/cm}^3$$

Entrando con los valores de ejes de carga equivalente de 200000 (factor de fatiga) y el valor de K (5.39 Kg/cm³) en el abaco planteado por la PCA, obtenemos que el espesor de suelo cemento es de 28.0 cm.

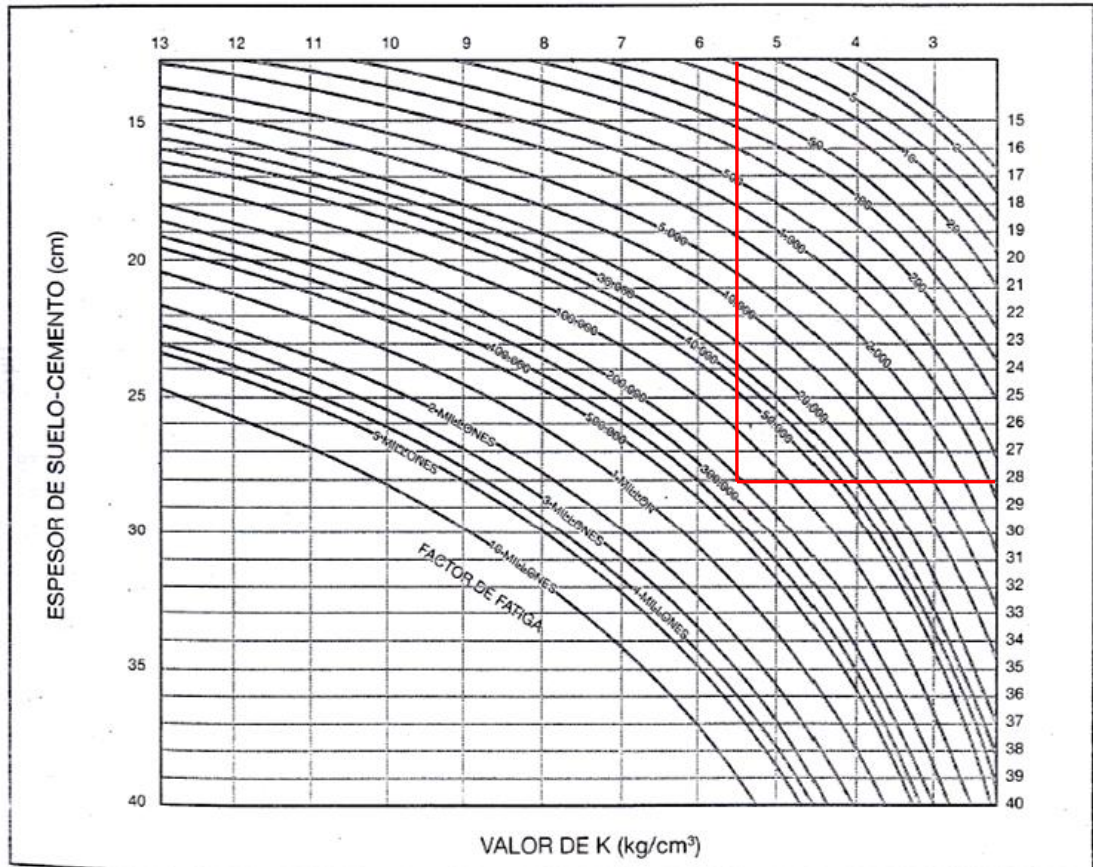


Gráfico N° 37. Abaco para diseño de espesor en suelo cemento fino.PCA.

Las bases de suelo cemento se deben recubrir con una capa de concreto asfáltico debido a su baja resistencia a la abrasión, causada por la circulación de los vehículos, y a la erosión provocada por el agua. En la Tabla N° 31. se dan algunos valores de espesores de concreto asfáltico, en función del espesor de base de suelo cemento.

Espesor de suelo cemento (cm)	Espesor de carpeta (cm)	
	Recomendado	Mínimo
12.5 - 15	2.0 – 4.0	TSS*
17.5	4.0 – 5.0	TSD**
20.0	4.0 – 6.5	2.5
22.5	5.0 – 7.5	5.0

* Tratamiento superficial simple
 ** Tratamiento superficial doble

Tabla N° 23. Espesores de carpeta asfáltica para base de cemento. Instituto Ecuatoriano del cemento y el concreto.

Por lo tanto para los datos del ejemplo se recomienda una base de suelo cemento de 28,0 cm con una capa de concreto asfáltico de 7.5 cm de espesor.

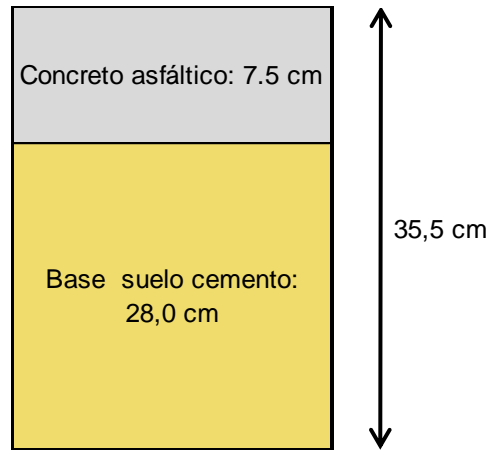


Gráfico N° 38. Espesor de pavimento estabilizado con cemento, método de la PCA.
Autor.

4.7.8.2 METODO AASHTO.

En vista que el método de la PCA no especifica la variación estructural de la base suelo cemento para las diferentes dosificaciones de cemento, se realiza la comprobación del diseño empleando la metodología de la AASHTO.

Cálculo del coeficiente estructural:

Datos:

Porcentaje de cemento = 9%

Resistencia a la compresión del suelo cemento a los 7 días = 22 Kg/cm²

Para resistencia a la compresión de 18 Kg/cm² tenemos un coeficiente de 0.047 (Ver Tabla N° 29)

Para resistencia a la compresión de 32 Kg/cm² tenemos un coeficiente de 0.049 (Ver Tabla N° 29)

Interpolando tenemos que para una resistencia a la compresión de 22 Kg/cm² se obtiene un coeficiente estructural de 0.057.

Datos para diseño

Coeficiente estructural de concreto asfáltico ($a_1 = 0.173$)

Coeficiente estructural de la base suelo cemento; $a_2 = 0.057$ (en cm.)

Coeficiente de drenaje ($m_2 = 1.0$)

SN (requerido) = 2.30

Desarrollo

Adoptando un espesor de carpeta asfáltica de 7.5 cm, nos queda la siguiente igualdad:

$$2.30 = 0.173 * 7.5 + 0.057 * D_2 * 1.0$$

Despejando D_2 tenemos:

$$D_2 = \frac{2.30 - (0.173 * 7.5)}{(0.057 * 1.0)} = 17.58 \text{ cm}$$

D_2 asumido = 20.0 cm

El espesor de pavimento queda de 7.5 cm de carpeta asfáltica con un espesor de base suelo cemento de 20.0 cm.

Comprobación de diseño

$$SN(\text{requerido}) \leq SN(\text{diseño})$$

$$2.30 \leq 0.173 * 7.5 + (20.0 * 0.057)$$

$$2.30 \leq 2.43; \text{“OK, cumple condición estructural para diseño”}$$

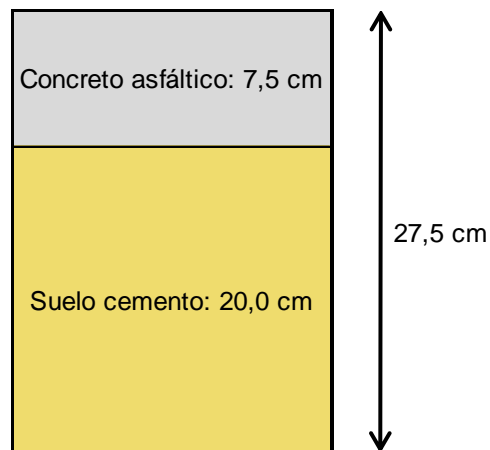


Gráfico N° 39. Espesor de pavimento estabilizado con cemento, método AASHTO.

Autor.

4.8.4 PRECIOS UNITARIOS

4.8.4.1 DEFINICIÓN

El precio unitario es la descripción del pago por unidad de obra que el contratante debe reconocer al contratista por concepto del rubro ejecutado. En términos generales el precio unitario está constituido de un costo directo y un costo indirecto.

4.8.4.2 COSTOS DIRECTOS

Son los costos que están asociados directamente con la obra. Corresponden a materiales, mano de obra, equipos y maquinarias comprometidas directamente con la ejecución. Se definen así porque

afectan de forma directa en la determinación del precio de cada rubro que interviene en la ejecución de la obra.

4.8.2.3 COSTOS INDIRECTOS

El costo indirecto corresponde a los gastos generales necesarios para la ejecución de los trabajos no incluidos en los costos directos que realiza el contratista, tanto en sus oficinas centrales como en la obra, y comprende entre otros: los gastos de administración, dirección técnica, supervisión, imprevistos y, en su caso, prestaciones laborales y sociales correspondientes al personal directivo y administrativo.

Los costos indirectos se expresan como un porcentaje del costo directo de cada concepto de trabajo, a continuación se realiza una estimación de costos indirectos:

COSTOS INDIRECTOS	PORCENTAJE (%)
Administración central y obra	8
Imprevistos	3
Garantías	4
Utilidad	8
Total	23

Tabla N° 24. Porcentaje de indirectos. Autor

4.8.2.4 PRECIO UNITARIO TOTAL

El costo total unitario es la suma del costo total unitario directo más el costo unitario indirecto. Estimar el costo total unitario es muy importante, porque consiste en la cotización que se suele hacer para establecer el precio de venta del artículo que se produce. Generalmente se estiman antes de que se realice la producción y entrega de productos.

$$PUT = CD + CI$$

Donde:

PUT = Precio unitario total

CD = Costo directo

CI = Costo indirecto

Formato a utilizar para el análisis de precios unitarios:

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:

ÍTEM:

Hoja

UNIDAD:

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL M					2.70
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
					0.35
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL O					
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					
INDIRECTOS: %					
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					

A continuación se detalla el análisis de precios unitarios de cada rubro:

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Excavación mecánica de suelo sin
clasificar
ÍTEM: 1

Hoja 1 de 7
UNIDAD: m³

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Excavadora	1.00	45.00	45.00	0.0600	2.70
SUBTOTAL M					2.70
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Operador de excavadora EO C1	1.00	3.02	3.02	0.0600	0.18
Ayudante de operador EO D2	1.00	2.82	2.82	0.0600	0.17
					0.35
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL O					
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					3.05
INDIRECTOS:				23.00%	0.70
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					3.75

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Conformación y compactación con equipo pesado Sub-rasante
ITEM: 2

Hoja 2 de 7
UNIDAD: m²

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Motoniveladora	1.00	20.00	20.00	0.0050	0.10
Rodillo compactador	1.00	20.00	20.00	0.0050	0.10
Tanquero	1.00	12.00	12.00	0.0050	0.06
SUBTOTAL M					0.26
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Peón EO E2	1.00	2.78	2.78	0.0050	0.01
Ayudante de maquinaria EO D2	2.00	2.82	5.64	0.0050	0.03
Operador motoniveladora EO C1	1.00	3.02	3.02	0.0050	0.02
Operador rodillo compactador EO C2	1.00	3.02	3.02	0.0050	0.02
Chofer licencia "e" EO C1	1.00	4.16	4.16	0.0050	0.02
SUBTOTAL O					0.08
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					0.36
INDIRECTOS: 23.00%				0.08	
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					0.42

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: desalojo del material a máquina
 ÍTEM: 3

Hoja 3 de 7
 UNIDAD: m³

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Herramienta menor	1.00	0.20	0.20	0.5714	0.11
Volqueta 8m3	1.00	15.00	15.00	0.5714	8.57
SUBTOTAL M					8.68
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Chofer licencia "e" EO C1	1.00	4.16	4.16	0.5714	2.38
Ayudante de maquinaria EO D2	1.00	2.82	2.82	0.5714	1.61
SUBTOTAL O					3.99
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL O					
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					12.67
INDIRECTOS:				23.00%	3.31
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					17.72

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: transporte del material

Hoja 4 de 7

ÍTEM: 4

UNIDAD: m³-
km

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	$D = \frac{C \times R}{R}$
Volqueta 8 m3	1.00	40.00	40.00	0.0050	0.14
SUBTOTAL M					0.14
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	$D = \frac{C \times R}{R}$
Chofer licencia "e" EO C1	1.00	4.16	4.16	0.0050	0.04
					0.04
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	$C = \frac{A \times B}{B}$	
SUBTOTAL O					
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	$C = \frac{A \times B}{B}$	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					0.18
INDIRECTOS: 23.00%					0.04
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					0.22

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: Base clase 2
 ÍTEM: 5

Hoja 5 de 7
 UNIDAD: m³

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Motoniveladora	1.00	20.00	20.00	0.0150	0.30
Rodillo compactador	1.00	20.00	20.00	0.0150	0.30
Tanquero	1.00	12.00	12.00	0.0150	0.18
SUBTOTAL M					0.78
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Peón EO E2	4.00	2.78	11.12	0.0150	0.17
Ayudante en general EO D2	3.00	2.78	8.34	0.0150	0.13
Chofer licencia "e" EO C1	1.00	4.16	4.16	0.0150	0.06
Operador EO C2	2.00	3.02	6.04	0.0300	0.18
SUBTOTAL N					0.54
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
BASE CLASE 2	m3	1.3000	12.43	16.16	
SUBTOTAL O				16.16	
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				17.45	
INDIRECTOS: 23.00%				4.01	
COSTO TOTAL DEL RUBRO:				21.46	

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: imprimación asfáltica
 ÍTEM: 6

Hoja 6 de 7
 UNIDAD: m²

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Distribuidor de asfalto	1.00	30.00	30.00	0.0080	0.07
Escoba autopropulsada	1.00	15.00	15.00	0.0080	0.12
SUBTOTAL M					0.19
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Peón EO E2	4.00	2.78	11.12	0.0080	0.09
Operador de distribuidor de asfalto EO C2	1.00	2.94	2.94	0.0080	0.02
Operador escoba autopropulsada EO C2	1.00	2.94	2.94	0.0080	0.02
SUBTOTAL N					0.14
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
ASFALTO AP-3 RC-350	gl	0.4000	1.75	0.70	
DIESEL	gl	0.2100	1.04	0.16	
SUBTOTAL O					0.40
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					0.73
INDIRECTOS: 23.00%					0.17
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					0.89

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: carpeta asfáltica 3"

Hoja 7 de 7

ÍTEM: 7

UNIDAD: m²

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Distribuidor de asfalto	1.00	30.00	30.00	0.0110	0.33
Cargadora frontal	1.00	20.00	20.00	0.0110	0.22
Planta asfáltica	1.00	120.00	120.00	0.0110	1.32
Rodillo compactador	1.00	20.00	20.00	0.0110	0.22
Rodillo sellador	1.00	25.00	25.00	0.0110	0.28
SUBTOTAL M					2.37
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Cuadrilla asfalto EO E2	6.00	2.78	16.68	0.0110	0.18
Operador finisher EO C2	1.00	3.02	3.02	0.0110	0.03
Operador planta asfáltica EO C2	1.00	3.02	3.02	0.0110	0.03
Operador rodillo EO C2	2.00	3.02	6.04	0.0110	0.07
Operador distribuidora de asfalto EO C2	1.00	3.02	3.02	0.0110	0.03
					0.34
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
MATERIAL FINO CRIBADO	m3	0.0900	11.30	1.02	
MATERIAL GRANULAR	m3	0.1200	11.30	1.36	
ASFALTO AP-3 RC-350	Kg	4.5000	0.19	0.86	
DIESEL	gl	0.1000	0.75	0.08	
SUBTOTAL O					3.32
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					6.10
INDIRECTOS:				23.00%	1.40
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					7.50

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA

4.8.5 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO BAJO CONDICIONES NATURALES DE SUB-RASANTE

**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
PRESUPUESTO GENERAL**

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

ELABORADO POR: DAVID CEDEÑO

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	TOTAL
1	Excavación mecánica de suelo sin clasificar	m ³	1,080.00	3.75	4,050.00
2	Conformación y compactación con equipo pesado Sub rasante.	m ²	6,000.00	0.42	2,016.00
3	Desalojo del material	m ³ -km	1,350.00	17.72	19,137.60
4	Transporte del material	m ³ -km	1,130.00	0.22	237.60
5	Base clase 2	m ³	1,350.00	21.46	23,176.80
6	Imprimación asfáltica	m ²	6,000.00	0.89	4,272.00
7	Carpeta asfáltica 3"	m ²	6,000.00	7.50	36,000.00
		TOTAL:			88,890.00

SON : OCHENTA Y OCHO MIL OCHOCIENTOS NOVENTA dólares 00/100 centavos

4.8.6 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO INCLUIDO ESTABILIZACIÓN DE LA SUB-RASANTE CON ENZIMAS ORGÁNICAS

**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
PRESUPUESTO GENERAL**

SUB-RASANTE ESTABILIZADA CON ENZIMAS ORGÁNICAS

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

ELABORADO POR: DAVID CEDEÑO

FECHA : 17/julio/2013

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	TOTAL
1	Excavación mecánica de suelo sin clasificar	m ³	600.00	3.62	1,737.60
2	Sub rasante estabilizada con enzimas orgánicas incluido asfalto, conformación y compactación con equipo pesado	m ²	6,000.00	3.34	16,032.00
3	Transporte del material	m ³ -km	750.00	0.25	150.00
4	Base clase 2	m ³	750.00	21.29	12,774.00
5	Imprimación asfáltica	m ²	6,000.00	1.06	5,088.00
6	Carpeta asfáltica 3"	m ²	6,000.00	7.36	35,328.00
		TOTAL:			71,109.60

SON: setenta y un mil ciento nueve dólares con 60/100 ctvs.

4.8.7 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO INCLUIDO ESTABILIZACIÓN DE LA SUB-RASANTE CON CEMENTO

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
PRESUPUESTO GENERAL

SUB-RASANTE ESTABILIZADA CON CEMENTO

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

ELABORADO POR: DAVID CEDEÑO

FECHA :17/junio/2013

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	TOTAL
1	Excavación mecánica de suelo sin clasificar	m ³	1,200.00	3.62	3,475.20
2	Sub rasante estabilizada con cemento, conformación y compactación con equipo pesado	m ²	6,000.00	4.26	20,448.00
3	Imprimación asfáltica	m ²	6,000.00	1.06	5,088.00
4	Carpeta asfáltica 3"	m ²	6,000.00	7.36	35,328.00
		TOTAL:			64,339.20

SON: sesenta y cuatro mil trescientos treinta y nueve dólares con 20/100 ctvs.

4.8.8 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL PAVIMENTO INCLUIDO ESTABILIZACIÓN DE LA SUB-RASANTE CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

PRESUPUESTO GENERAL

SUB-RASANTE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUB-RASANTE

ELABORADO POR: DAVID CEDEÑO

FECHA :17/julio/2013

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	TOTAL
1	Excavación mecánica de suelo sin clasificar	m3	750.00	3.62	2,172.00
2	Sub rasante estabilizada con emulsión asfáltica, tendido, conformación y compactación con equipo pesado	m2	6,000.00	4.56	21,888.00
3	Imprimación asfáltica	m2	6,000.00	1.06	5,088.00
4	Carpeta asfáltica 3"	m2	6,000.00	7.36	35,328.00
		TOTAL:			64,476.00

SON : sesenta y cuatro mil cuatrocientos setenta y seis dólares americanos

De los presupuestos calculados de cada uno de los procedimientos a emplear obtenemos:

	Suelo natural	Estabilización con enzimas	Estabilización con cemento	Estabilización con emulsión
Presupuesto	88,890.00	71,109.60	64,339.20	64,476.00

Tabla Nº 25. Presupuestos de construcción

Expresados los valores en la Tabla Nº 32, se puede determinar el presupuesto de menor valor con su respectivo procedimiento a emplear.

El presupuesto más bajo corresponde a la estabilización de la sub-rasante utilizando cemento.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De los ensayos de laboratorio realizados, se determina que la clasificación del suelo en estudios es A-4.
- Con el ensayo CBR aplicado al suelo natural en estudio, se obtiene un valor de 9.5%, lo cual indica que su capacidad de soporte es deficiente.
- La investigación realizada demuestra que la estabilización de los suelos provenientes del propio proyecto es un método de aprovechamiento del mismo y evitar acarrees de materiales importados.
- Se demuestra que la estabilización realizada mejora de manera importante las características físicas y mecánicas iniciales del suelo de sub-rasante, aumentando su valor CBR de 9.5% a 15.8%
- De acuerdo a los ensayos realizados se obtienen los siguientes datos para el diseño de la mezcla con la muestra de este suelo:

Estabilización del suelo	% óptimo de estabilizante
Suelo – enzimas orgánicas	1 lt cada 30 m ³
Suelo – emulsión asfáltica	8%
Suelo – cemento	9%

- El contenido de cemento que se puede utilizar para alcanzar la resistencia que cumpla el rango especificado (18 Kg/cm² – 35 Kg/cm²), es el 9% respecto al suelo seco con una resistencia de 22Kg/cm².

- Elaborado el diseño de los espesores de la estructura del pavimento y los respectivos presupuestos de construcción, se selecciona la opción más económica para el proceso de estabilización, la cual es la aplicación de cemento al suelo de sub-rasante.
- El espesor propuesto para soportar las solicitudes de tráfico es de 20 cm de mejoramiento de suelo - cemento
- La sub-rasante es el suelo de fundación de los pavimentos, lo cual hace necesario el mejoramiento de sus propiedades físicas y mecánicas, la estabilización de la misma es un método apropiado para dicho fin, obteniendo resultados satisfactorios a menores costos. 88,890.00
- Los resultados expuestos en esta investigación no pueden adoptarse a suelos similares, inclusive a los pertenecientes al mismo grupo de clasificación.
- Para cada tipo de suelo que se vaya a estabilizar, deben realizarse los ensayos de laboratorio correspondientes para la determinación del porcentaje óptimo del estabilizante.
- El uso de una adecuada técnica constructiva y la combinación óptima de agua, cemento y la energía de compactación son fundamentales para lograr sub-rasantes de calidad y excelente desempeño, minimizando de esta forma el agrietamiento por fraguado.
- El control de humedad en obra, es fundamental ya que incrementos del 1% a la humedad óptima en la mezcla del suelo nos reduce notablemente la resistencia a la compresión simple.

5.1 BIBLIOGRAFÍA

1. GONZALES MOYA, Fernando; Fundamentos de la Mecánica de Suelos.
2. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.
3. AASHTO –T89; Límites de Atterberg.
4. AASHTO –T180; Compactación de Suelos.
5. AASHTO –T193; Relación de Soporte de California.
6. ASPHALT INSTITUTE; AEMA. (2001). Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, MS N° 19S. Lexington.
7. MOP-001-F-2002. (2002). Especificaciones Generales para la construcción de Caminos y puentes.
8. INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO; INECYC, Bases de suelo cemento.
9. VÁSQUEZ. (2004). Programa Cálculo del Número Estructural AASHTO 1993. Manizales, Colombia.
10. HARRIS, J. (2007). Diseño de Pavimento Flexible AASHTO.
11. BOWLES (1982), Propiedades geofísicas de los suelos.
12. JIMÉNEZ ACUÑA, SIBAJA OBANDO, & MOLINA ZAMORA, 2008.
13. VISCARRA AGREDA, Fabián; El Cono Dinámico De Penetración y Su Aplicación En La Evaluación de Suelos.