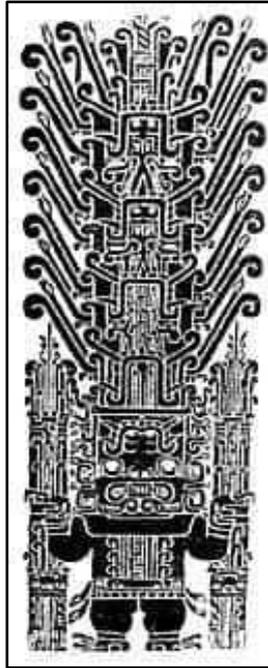


**UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MCT EN ESTUDIO DE
SUELOS TROPICALES CON FINES DE PAVIMENTACIÓN
EN LA SELVA BAJA DEL PERÚ.
CASO: CAMINOS VECINALES DE MADRE DE DIOS.**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

JONATHAN OSCAR REQUIZ CRISTÓBAL

LIMA-PERÚ

2018

A mis queridos padres Michelle y Oscar, por su dedicación y apoyo en la consecución de mis metas profesionales; y a mis padrinos Bertha y Guillermo, por los consejos y el ejemplo de perseverancia para alcanzar las metas.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Juan Sánchez Guando, por el apoyo, la confianza y el constante aliento de superación que ha permitido mantenerme firme en el desarrollo de esta tesis y en mis actividades académicas durante el pregrado.

Al Dr. Gerber Zavala Ascaño, por la asesoría técnica brindada en esta investigación, y ser mi ejemplo de superación profesional.

A los ingenieros y técnicos de la Dirección de Estudios Especiales del MTC, por su apoyo brindado para realizar satisfactoriamente los trabajos en el laboratorio.

A mis familiares y amigos, por su valioso apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

A mi asesor de tesis, Ing. Gustavo Aybar, por su disposición y los consejos académicos necesarios para la concretización de esta tesis.

RESUMEN

En esta investigación se aplica la metodología Miniatura Compacto Tropical (MCT) en el estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación, con la cual se busca conocer la incidencia positiva significativa de su empleo en la realidad de la selva baja del Perú, específicamente en la región Madre de Dios.

Se realizó el estudio de suelos de dos caminos vecinales en el cual se ejecutaron ensayos tradicionales y ensayos miniatura referente a la caracterización, compactación y evaluación del comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos para comparar resultados, criterios técnicos, y cuestiones económicas de estudio. Se compararon pavimentos estructurados con el método AASHTO 93 a partir de los ensayos tradicionales y miniatura. Por otro lado, se propuso un método de estructuración de pavimentos que emplea parámetros de los ensayos miniatura y permite el aprovechamiento del material propio de las zonas tropicales.

Se concluyó que los ensayos de la metodología MCT se acercan más a la realidad de los suelos tropicales por los criterios específicos de caracterización, clasificación en base a suelos lateríticos y saprolíticos, y la inclusión de ensayos hidrogeológicos. Por otro lado, son más precisos debido al diseño de los equipos y el empleo de menor energía de operación. Asimismo, emplean menor cantidad de muestra y tiempo de ejecución, respectivamente el 14% y 94%, de lo empleado en los ensayos tradicionales. Respecto a los pavimentos estructurados con el método AASHTO 93, los espesores obtenidos a partir de los ensayos CBR y Mini CBR de la subrasante difieren hasta un 8.4%, por lo cual el ensayo miniatura es una alternativa para la estructuración de pavimentos bajo la normativa actual.

Finalmente se concluye que la incidencia de la metodología MCT en el estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación es significativamente positiva.

Palabras clave: Miniatura Compacto Tropical, ensayos miniatura, hidrogeológico.

ABSTRACT

In this research, the Tropical Compact Miniature (MCT) methodology is applied to the study of tropical soils for paving purposes, with which we want to know the significant positive impact of this methodology on the reality of the lowland forest of Peru, specifically in the Madre de Dios region.

The study of soils of 2 local roads was carried out in which traditional tests and miniature tests were carried out, referring to the characterization, compaction and evaluation of the mechanical and hydrogeological behavior of soils, to compare results, technical criteria, and economic study issues. . Structured pavements were compared with the AASHTO 93 method from traditional and miniature tests. On the other hand, a method of structuring pavements was proposed that uses the parameters of the miniature tests and allows the use of the material typical of the tropical zones.

It was concluded that the MCT methodology trials are closer to the reality of tropical soils with specific characterization criteria, classification based on lateritic and saprolitic soils, and the inclusion of hydrogeological tests. On the other hand, they are more precise due to the design of the equipment and the use of lower operating energy. Likewise, they use less sample and execution time, respectively 14% and 94%, than what is used in traditional tests. Regarding the structured pavements with the AASHTO 93 method, the thicknesses obtained from the CBR and Mini CBR tests differ up to 8.4%, for which the miniature test is an alternative for the structuring of pavements under the current regulations.

Finally, it is concluded that the incidence of the MCT methodology in the study of tropical soils for paving purposes is significantly positive.

Keywords: *Compact Tropical Miniature, miniature tests, hydrogeological.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
1. CAPITULO I: GENERALIDADES	9
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1.1. Antecedentes nacionales.....	9
1.1.2. Antecedentes internacionales.....	9
1.1.3. Definición del Problema.....	10
1.1.4. Formulación del Problema.....	10
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	11
1.3. OBJETIVOS.....	11
1.3.1. Objetivo General	11
1.3.2. Objetivos Específicos	11
1.4. HIPÓTESIS	12
1.4.1. Hipótesis General	12
1.4.2. Hipótesis Específicas.....	12
1.5. ESTRUCTURA DE TRABAJO	12
2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. METODOLOGÍA TRADICIONAL	14
2.1.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	14
2.1.2. ENSAYOS GEÓTECNICOS.....	15
2.1.3. MÉTODOS DE ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS	19
2.2. SUELOS TROPICALES	21
2.2.1. SUELOS LATERÍTICOS	22
2.2.2. SUELOS SAPROLÍTICOS	23
2.3. METODOLOGÍA MCT	24
2.3.1. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN MCT	25
2.3.2. ENSAYOS MINIATURA	26
2.3.3. OTROS MÉTODOS DE ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS	33
3. CAPITULO III: METODOLOGÍA	35
3.1. ETAPA 1 DE GABINETE.....	35
3.2. ETAPA DE LABORATORIO	36
3.2.1. METODOLOGÍA TRADICIONAL.....	36
3.2.2. METODOLOGÍA MCT.....	40
3.3. ETAPA 2 DE GABINETE.....	51
3.3.1. COMPARATIVO DE ENSAYOS TRADICIONALES Y MINIATURA	51
3.3.2. ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS – MÉTODO AASHTO 93	51
3.3.3. PROPUESTA METODOLÓGICA DE ESTUDIO Y ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS CON SUELOS TROPICALES	52

4. CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
4.1. MÉTODOS TRADICIONALES.....	53
4.1.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN, Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS ...	53
4.1.2. ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO, CBR Y EXPANSIÓN.....	54
4.2. METODOLOGÍA MCT	55
4.2.1. ENSAYOS MINI MCV Y PÉRDIDA DE MASA POR INMERSIÓN	55
4.2.2. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN MCT.....	60
4.2.3. ENSAYOS MINI PROCTOR Y MINI CBR.....	60
4.2.4. ENSAYOS HIDROGEOLÓGICOS	61
4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTUDIO.....	62
4.3.1. LABORATORIO	62
4.3.2. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	63
4.3.3. COMPACTACIÓN DE SUELOS	63
4.3.4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SUELOS	65
4.3.5. COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICOS DE SUELOS	66
4.4. ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS – AASHTO 93.....	67
4.5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS CON SUELOS TROPICALES.....	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
CONCLUSIONES.....	71
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
ANEXOS	74
a) PANEL FOTOGRÁFICO.....	74
a.1) Ejecución de ensayos tradicionales	74
a.2) Ejecución de ensayos miniatura	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01	Simbología del sistema de clasificación AASHTO	14
Figura 02	Simbología del sistema de clasificación SUCS	15
Figura 03	Clasificación de suelos según el índice de plasticidad.....	17
Figura 04	Clasificación de suelos según el valor de CBR.....	18
Figura 05	Distribución del clima tropical de la selva del Perú	21
Figura 06	Ubicación de los suelos lateríticos a nivel mundial	23
Figura 07	Ábaco del sistema de clasificación MCT	26
Figura 08	Metodología de la investigación	35
Figura 09	Gráfico de esfuerzos vs penetraciones, y sus correcciones	39
Figura 10	Lectura del dial en ensayo Mini-MCV.....	41
Figura 11	Ensayo de Pérdida de masa por inmersión en agua	42
Figura 12	Ensayo Mini Proctor	44
Figura 13	Ajuste del dial de penetración, ensayo Mini CBR	46
Figura 14	Última lectura del dial, ensayo de Expansión.....	47
Figura 15	Ensayo de Infiltrabilidad	48
Figura 16	Ensayo de Permeabilidad	49
Figura 17	Ensayo de Contracción	50
Figura 18	Curvas de deformabilidad del suelo M-1	56
Figura 19	Curvas de compactación del suelo M-1	57
Figura 20	Curva de Pérdida de masa por inmersión del suelo M-1	57
Figura 21	Curvas de deformabilidad del suelo M-2.....	59
Figura 22	Curvas de compactación del suelo M-2	59
Figura 23	Curva de Pérdida de masa por inmersión del suelo M-2	59
Figura 24	Clasificación de los suelos M-1 y M-2 en el gráfico MCT.....	60
Figura 25	Comparativo de cantidad de muestra y tiempo empleado	62
Figura 26	Comparativo de cantidad de muestra y tiempo empleado para 1km	62
Figura 27	Comparativo de los OCH obtenidos por ambas metodologías	64
Figura 28	Comparativo de las MDS obtenidas por ambas metodologías	65
Figura 29	Comparativo de los valores de CBR, *CBR y Mini CBR, en base al CBR ..	66
Figura 30	Pavimentos estructurados a partir de los ensayos CBR y Mini CBR, con ejes equivalentes asumidos: 100 000 EE, 250 000 EE y 500 000 EE.....	68
Figura 31	Comparativo de los espesores para 100 000 EE, en base a los espesores obtenidos a partir del CBR tradicional	68
Figura 32	Comparativo de los espesores para 250 000 EE, en base a los espesores obtenidos a partir del CBR tradicional	68
Figura 33	Comparativo de los espesores para 500 000 EE, en base a los espesores obtenidos a partir del CBR tradicional	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01	Peso específico de los sólidos y límites de consistencia	53
Tabla 02	Granulometría y clasificación de suelos	54
Tabla 03	Proctor modificado, CBR y Expansión	54
Tabla 04	Mini MCV y Pérdida de masa por inmersión del M-1	56
Tabla 05	Mini MCV y Pérdida de masa por inmersión del M-2	58
Tabla 06	Mini MCV, Pérdida de masa por inmersión y Clasificación MCT	60
Tabla 07	Mini Proctor y Mini CBR	61
Tabla 08	Ensayos hidrogeológicos	61
Tabla 09	Resumen de clasificaciones de suelos	63
Tabla 10	Resumen de características de compactación de suelos	64
Tabla 11	Valores de CBR, *CBR y Mini CBR	65

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se basa en los estudios de suelos tropicales con fines de pavimentación, que se pueden definir como conocer las propiedades y comportamiento geotécnico de estos suelos para la conformación de la sub rasante o cuerpo del pavimento. Las deficiencias de estos estudios en el Perú son debido a los criterios inadecuados que presentan para conocer las propiedades intrínsecas y prever el comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos tropicales, esto influye en el tiempo de vida útil de las infraestructuras viales que sobre estos suelos se construyen.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar las causas. La normativa peruana bajo cuyos lineamientos se llevan a cabo los proyectos viales en el Perú, se basan en normas internacionales como la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) y la Asociación Americana de Carreteras y Transporte (AASHTO), que fueron creados, verificados y ajustados en países de climas templado y frío. Por esta razón, la metodología tradicional es eficaz en las regiones de la costa y sierra del país, sin embargo en la selva peruana genera sobrecostos y en algunos casos es inaplicable debido a que los suelos de dicha región están sometidos bajo condiciones atmosféricas, geográficas e hidrológicas característicos de un clima tropical húmedo.

La investigación de esta problemática se desarrolló por el interés de conocer las deficiencias técnicas de la metodología tradicional de estudio de suelos tropicales y estructuración de pavimentos sobre estos suelos, y conocer las desventajas económicas que estas generan.

Por otra parte, proponer una metodología desarrollada con criterio específico para el estudio de los suelos tropicales que permita conocer las características intrínsecas de estos suelos y prever su comportamiento geotécnico, lo cual posibilita el empleo de los propios suelos de la zona en la conformación de pavimentos al incluir un método adecuado de estructuración. De esta manera, garantizar el tiempo de vida útil de las infraestructuras viales en la selva baja, lo que devendrá en un mayor desarrollo socio-económico en las comunidades involucradas.

La investigación se realizó con suelos de los caminos vecinales: Dc. Km 166-Tropezón y La Joya-Infierno de la región Madre de Dios, en el laboratorio de la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones en el año 2017.

El diseño de investigación consta en tres etapas: la primera etapa abarca la recopilación de información bibliográfica y capacitación técnica en la ejecución de ensayos miniatura; en la segunda, la ejecución de los ensayos tradicionales y miniatura proyectados; y en la tercera etapa, se realizan comparaciones técnicas entre los resultados de los ensayos, se emplean dichos resultados en estructuración de pavimentos y se propone un nuevo método de estructuración para el aprovechamiento del material propio de las zonas tropicales.

En esta investigación se busca conocer la incidencia de la aplicación de la metodología MCT en el estudio de suelos tropicales de la selva baja del Perú, con fines de pavimentación, para lo cual se analizan los resultados obtenidos en los ensayos, se comparan los pavimentos estructurados con el método AASHTO 93, y se propone el método SAFL para estructuración de pavimentos que emplea los parámetros de la metodología MCT.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes nacionales

La Sección de Suelos y Pavimentos 2014, las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (EG-2013) y el Manual de Ensayos de Materiales, son los manuales actuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, bajo cuyos lineamientos se llevan a cabo los proyectos viales en el Perú. Estos manuales se basan en normas internacionales como la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), que fueron creados, verificados y ajustados en países que presentan climas de templado a frío. Los métodos que se desarrollan en estos manuales son eficaces en las regiones de la costa y sierra del país, sin embargo su aplicación en la selva peruana genera elevados costos y en otros casos es inaplicable debido a que los suelos de dicha región están sometidos bajo otras condiciones atmosféricas, geográficas e hidrológicas, característicos de un clima tropical, por lo tanto se deben emplear metodologías con criterio específico para el estudio de sus propiedades geotécnicas.

1.1.2. Antecedentes internacionales

Las normas internacionales antes mencionadas también son asumidas en numerosos países del mundo y en casi todo Latinoamérica. Sin embargo entre ellos, Brasil es el país que desarrolla proyectos viales bajo una normativa que involucra una metodología propia, desarrollada debido a la presencia predominante de suelos tropicales en el territorio brasilero y por la necesidad de generar soluciones técnicas que hagan frente a los retos geotécnicos que se generan a partir de la acción de los agentes climatológicos, las propiedades de estos tipos de suelos y su comportamiento característico

1.1.3. Definición del problema

Las deficiencias que presentan los estudios de suelos tropicales y la estructuración de pavimentos proyectados sobre estos suelos, con métodos tradicionales, influyen en el tiempo de vida útil de las obras viales. Por la parte de estudios, estos métodos no permiten conocer las características intrínsecas, ni prever el comportamiento mecánico e hidrogeológico más cercano que desarrollan los suelos tropicales en campo. Asimismo, el transporte de material de estudio desde los puntos de prospección hasta los laboratorios y la ejecución de ensayos, emplean tiempos prolongados y generan elevados costos, por los cuales se atiende una menor longitud de carretera. Por otro lado, la estructuración de pavimentos con estos métodos genera sobrecostos y alto grado de impacto ambiental en la etapa de ejecución, ya sea por el empleo de productos estabilizantes o por transporte de material granular de préstamo desde regiones alejadas.

Las desventajas técnicas, económicas y ecológicas ya mencionadas no permiten que se realicen las construcciones, rehabilitaciones o mejoramientos necesarios para la buena conservación de los caminos vecinales en la región Madre de Dios, por lo cual, se reducen las posibilidades de descentralización y crecimiento socio-económico en las comunidades involucradas.

1.1.4. Formulación del problema

Problema general

Los estudios de suelos tropicales con fines de pavimentación para los caminos vecinales de Madre de Dios, son deficientes.

Problemas específicos

- La metodología tradicional no es adecuada para el estudio de suelos tropicales de la selva baja del Perú.

- La estructuración de pavimentos en base a métodos tradicionales son deficientes para las zonas tropicales del país.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El empleo de una metodología adecuada, como la MCT, cuyo empleo permite conocer las características intrínsecas de los suelos tropicales y prever su comportamiento geotécnico, optimizará el uso racional de los suelos propios de la zona y garantizará el tiempo de vida útil de la estructura vial; lo que devendrá en un mayor desarrollo socio-económico en las comunidades de la región Madre de Dios.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Determinar la incidencia positiva significativa de la metodología MCT en el estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación para los caminos vecinales de Madre de Dios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Comparar los ensayos tradicionales de la normativa peruana y ensayos miniatura de la normativa brasilera, correspondientes a la caracterización, compactación y evaluación del comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos tropicales.
- Comparar los pavimentos estructurados, de acuerdo a la normativa peruana, a partir de los ensayos tradicionales y los ensayos miniatura.
- Proponer una metodología de estudio de suelos tropicales que permita el uso del material propio en la estructuración de pavimentos.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

La aplicación de la metodología MCT en el estudio de suelos tropicales brinda soluciones a los problemas de pavimentación en los caminos vecinales de Madre de Dios,

1.4.2. Hipótesis específicas

- La aplicación de la metodología MCT en vez de la metodología tradicional, consigue ventajas técnicas, económicas y ecológicas en los estudios de suelos tropicales con fines de pavimentación.
- Los pavimentos estructurados, de acuerdo a la normativa peruana, a partir de los ensayos tradicionales y ensayos miniatura, son similares.
- Si se aplica la metodología MCT, que es adecuada para el estudio de suelos tropicales en el Perú, los resultados obtenidos serán ajustables a los parámetros que exigen los métodos brasileros para estructuración de pavimentos.

1.5. ESTRUCTURA DE TRABAJO

La estructura del trabajo de investigación consiste en cuatro capítulos distribuidos de la siguiente forma:

- Capítulo 1: Se presenta el problema y la importancia del empleo de la metodología MCT con fines de pavimentación. Asimismo, se describen los objetivos y las hipótesis.
- Capítulo 2: Contiene el marco teórico referente a los criterios técnicos y ensayos de la metodología tradicional y la metodología MCT. Se presenta información relacionada a los suelos tropicales y sus variedades.

- Capítulo 3: Muestra la metodología de investigación, que inicia con la revisión bibliográfica referente a la metodología MCT y la operación de equipos. La etapa de laboratorio contiene los procedimientos a emplearse de acuerdo a las normas correspondientes. Finalmente, se presenta los criterios para el análisis de resultados.
- Capítulo 4: Contiene los resultados de los ensayos y el comparativo realizado entre ambas metodologías. Asimismo, la estructuración de pavimentos con la normativa peruana y con los resultados de ambas metodologías. Finalmente, la metodología propuesta para estudio y estructuración de pavimentos con material propio de zonas tropicales.
- Finalmente se muestra las conclusiones y recomendaciones generadas a partir del análisis de resultados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. METODOLOGÍA TRADICIONAL

La metodología tradicional que se emplea en el Perú para los estudios de suelos y diseño de pavimentos, fue desarrollada en base a las normas internacionales American Society for Testing and Materials (ASTM) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), a partir de las cuales el Ministerio de Transportes y Comunicaciones publicó la normatividad vigente: Sección de Suelos y Pavimentos 2014, Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (EG-2013) y Manual de Ensayos de Materiales.

2.1.1. Clasificación de suelos

Los sistemas tradicionales de clasificación de suelos son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), desarrollados para caracterización de suelos para proyectos de edificaciones y viales, respectivamente. Sin embargo, en los estudios de proyectos viales también se emplea el sistema SUCS para contar con información más detallada de los suelos. La simbología que se emplea para la descripción de cada tipo de suelo, según los sistemas AASHTO y SUCS, son los que se muestran en la Figura 1 y Figura 2, respectivamente.

Simbología	Clasificación	Simbología	Clasificación
	A - 1 - a		A - 5
	A - 1 - b		A - 6
	A - 3		A - 7 - 5
	A - 2 - 4		A - 7 - 6
	A - 2 - 5		Materia Orgánica
	A - 2 - 6		Roca Sana
	A - 2 - 7		Roca Desintegrada
	A - 4		

Figura 1.- Simbología del sistema de clasificación AASHTO.

Fuente: Manual de Suelos y Pavimentos – MTC

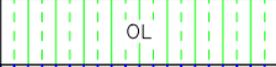
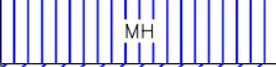
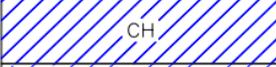
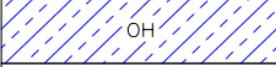
	GW	Gravas bien mezclada arena, grava con poco o nada de material fino, variación en tamaños granulares.
	GP	Grava mal graduadas, mezcla de arena-grava con poco nada de material fino.
	GM	Gravas limosas mezclas de grava arena limosa.
	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava-arena-arcilla gravas con material fino cantidad apreciable de material fino.
	SW	Arena bien graduadas, arenas con grava, poco o nada de material fino. Arenas limpias poco o nada, amplia variación en tamaño granulares y cantidades de partículas en tamaño intermedios.
	SP	Arena mal graduadas con grava poco o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas internas.
	SM	Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy baja.
	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena-arcillosa.
	ML	Limos orgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas o limos arcillosos con ligera plasticidad.
	CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o mediana, arcillas gravas, arcillas arenosas, arenas limosas, arcillas magras.
	OL	Limos orgánicas y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad.
	MH	Limo inorgánicas suelos finos granosos o limosos, micáceas o diatometáceas, limos elásticos.
	CH	Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad, arcillas grasosas.
	OH	Arcillas orgánicas de mediana o elevada plasticidad, limos orgánicas.
	Pt	Turba, suelos considerablemente orgánicos.

Figura 2.- Simbología del sistema de clasificación SUCS.

Fuente: MTC E 101-2000.

2.1.2. Ensayos geotécnicos

Los ensayos tradicionales que corresponden a un estudio de suelos con fines de pavimentación, involucra ensayos de caracterización, compactación y evaluación del comportamiento mecánico frente a cargas externas.

Ensayos para caracterización de Suelos

Los procedimientos que permiten determinar el tipo de suelos por los sistemas SUCS y AASHTO son los ensayos de análisis granulométrico y límites de consistencia, los cuales permiten conocer las características físicas y la propiedad plástica de los suelos.

a. Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107-2000, ASTM D 422).

Este ensayo permite conocer la distribución granulométrica de los suelos, quiere decir, determina la proporción de grava, arena y finos que contienen los suelos, cuya composición da un indicio de su comportamiento geotécnico. El juego de tamices que se emplean varían desde el tamiz de 3" (76.1 mm) de abertura, hasta el N°200 (0.074 mm), por lo cual el tamaño máximo de los elementos de los suelos para este ensayo es de 3 pulgadas.

b. Límite Líquido (MTC E 110-2000, ASTM D 4318).

El límite líquido es el límite entre los estados plástico y líquido del suelo, esta transición se da al modificar su contenido de humedad. En efecto, este ensayo permite conocer el porcentaje de humedad, correspondiente al peso del suelo seco, con el que alcanza su límite líquido. Este estado es asumido principalmente por las partículas finas y arenas finas, por lo cual el ensayo se realiza con el material que pasa el tamiz N° 40 (0.425 mm).

El equipo que se emplea está compuesto por una copa Casagrande, un acanalador, y un calibrador de altura de impacto de la copa que usualmente se encuentra incorporado en el acanalador.

c. Límite Plástico (MTC E 111-2000, ASTM D 4318).

El límite plástico de los suelos es el límite entre sus estados plástico y semisólido, esta transición se obtiene con la variación del contenido de humedad. Este ensayo permite determinar el porcentaje de humedad con el que se encuentra en este límite.

El instrumento principal del ensayo es el vidrio esmerilado, sobre su superficie se forman barras cilíndricas de suelo hasta alcanzar los 3.2 mm (1/8") de diámetro, realizando rodamientos con la palma de la mano.

Por otro lado, el límite plástico y el límite líquido, permiten conocer el índice de plasticidad del suelo, cuyo valor representa el rango de humedad con el que el suelo se encuentra en el estado plástico. La magnitud de la plasticidad indica si el suelo presenta buena o mala estabilidad frente a la presencia de agua (Figura 3). Este estado las asumen principalmente las partículas finas y arenas finas, por esa razón el ensayo se realiza con el material que pasa el tamiz N° 40 (0.425 mm).

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	suelos arcillosos
IP < 7	Baja	suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	suelos exentos de arcilla

Figura 3.- Clasificación de suelos según el índice de plasticidad
Fuente: Manual de Suelos y Pavimentos - MTC

Ensayo para Compactación de Suelos

El ensayo tradicional para determinar las características de compactación de los suelos con fines de pavimentación, es el Proctor Modificado, cuyos datos son considerados en ensayos de prueba y compactación en campo

Proctor Modificado (MTC E 115-2000, ASTM D 4318).

El desarrollo de este ensayo está íntimamente ligado a la compactación de los materiales que componen el terraplén, la sub rasante, base y sub base del pavimento.

El objetivo de este ensayo es determinar el óptimo contenido de humedad (OCH) con el cual se alcanza la máxima densidad seca (MDS) del suelo. Para tal fin, el suelo es compactado tanto con bajas como altas humedades, y al graficarlos en una plano OCH versus MDS, se obtiene lo requerido.

El equipo principal que se emplea en el ensayo consiste en un martillo de 4.54 kg y moldes de 4" (101.6 mm) o 6" (152.4 mm) de diámetro, seleccionadas de acuerdo a la granulometría del suelo. En el ensayo, se deja caer el martillo repetidas veces desde una altura de 18" (457 mm) para aplicar una energía resultante de 2700 kN-m/m³.

Ensayo de evaluación del comportamiento geotécnico de los Suelos

El ensayo tradicional que ha sido desarrollado para conocer el comportamiento mecánico de los suelos por medio del valor de su capacidad de soporte, y determinar la susceptibilidad hídrica con el valor de expansión, es el ensayo CBR.

CBR y Expansión (MTC E 132-2000).

Este ensayo permite conocer la capacidad de soporte de los suelos frente a cargas externas, que representan las cargas vehiculares y peso propio del pavimento. Por otro lado, permite conocer el comportamiento hidrogeológico relacionado a la expansión, al ser sumergidos en agua por 72 horas.

Los valores de soporte y expansión dan referencias aproximadas sobre las condiciones del suelo, y si estas se encuentran aptas para el uso requerido. Para la evaluación de la sub rasante existen rangos de CBR que categorizan estos suelos desde un nivel inadecuado hasta uno excelente (Figura 4).

Categorías de Sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Figura 4.- Clasificación de suelos según el valor de CBR
Fuente: Manual de Suelos y Pavimentos – MTC

2.1.3. Métodos de estructuración de pavimentos

Los métodos tradicionales para estructuración de pavimentos que se emplean actualmente en el Perú son los métodos extranjeros NAASRA y AASHTO 93, asimilados por el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

National Association of Australian State Road Authorities (NAASRA)

El método NAASRA, también conocido actualmente como AUSTROADS, permite dimensionar el espesor del afirmado (pavimento sin carpeta asfáltica) con la Ecuación 1. Esta ecuación relaciona el soporte del suelo, expresado con valores de CBR, y las cargas externas expresadas con número de repeticiones de ejes equivalentes.

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10} \text{CBR}) + 58 \times (\log_{10} \text{CBR})^2] \times \log_{10}(\text{Nrep}/120) \quad (1)$$

Donde:

e = espesor del afirmado (mm)

CBR = capacidad de soporte de la sub rasante (%)

Nrep = número de repeticiones de ejes equivalentes

Los afirmados son proyectados para carreteras de bajo volumen de tránsito, considerados para número de repeticiones hasta 300, 000 EE, y se proyecta su vida útil para diez años.

Manual de Diseño de Pavimentos en base al Método AASHTO - 93

El método AASHTO 93 permite determinar los espesores de las capas que conforman los pavimentos flexibles y pavimentos rígidos. Fue desarrollado en base a estadísticas generadas a partir de numerosos ensayos realizados por varios años, por lo cual es denominado como método empírico.

Este método determina los espesores de la sub base, base y carpeta asfáltica considerando los parámetros de tráfico, de la sub rasante y de

los valores estadísticos. La estructuración se consigue con el empleo de la Ecuación 2, en el cual los parámetros permiten determinar un número estructural del pavimento. Este número estructural junto a los coeficientes estructurales y de drenaje que son generados de acuerdo al material de composición, calculan los espesores del pavimento a partir de tabulaciones con la Ecuación 3.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN+1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07 \quad (2)$$

Donde:

W_{18} = número de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2 t para el periodo de diseño

M_R = módulo de resiliencia (psi)

Z_R = coeficiente estadístico de desviación estándar normal

S_o = desviación estándar combinada

ΔPSI = variación de serviciabilidad

SN = número estructural

$$SN = a_3 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3 \quad (3)$$

SN = número estructural

a_1, a_2, a_3 = coeficientes estructurales de las capas: superficial, base y sub base, respectivamente

d_1, d_2, d_3 = espesores de las capas: superficial, base y sub base, respectivamente (cm)

m_2, m_3 = coeficientes de drenaje para las capas: superficial, base y sub base, respectivamente

Los espesores se definen con el criterio de los proyectistas, y el número estructural resultante es mayor al generado en la ecuación 2.

2.2. SUELOS TROPICALES

Son suelos compuestos principalmente por suelos finos, y son formados bajo las condiciones atmosféricas, geográficas e hidrológicas de un clima tropical húmedo, como el clima de la selva peruana.

El clima tropical de la selva peruana es el principal agente para la formación de los suelos tropicales en esas zonas, principalmente la acción lluvias y temperatura sobre estos suelos. De acuerdo con Carrillo, la lluvia determina la humedad del suelo, la aireación y el grado de lavaje el perfil; mientras que la temperatura tiene acción directa sobre la formación del suelo e influye en la velocidad de las reacciones químicas, que se duplican por cada 10°C de incremento de temperatura (Figura 5).

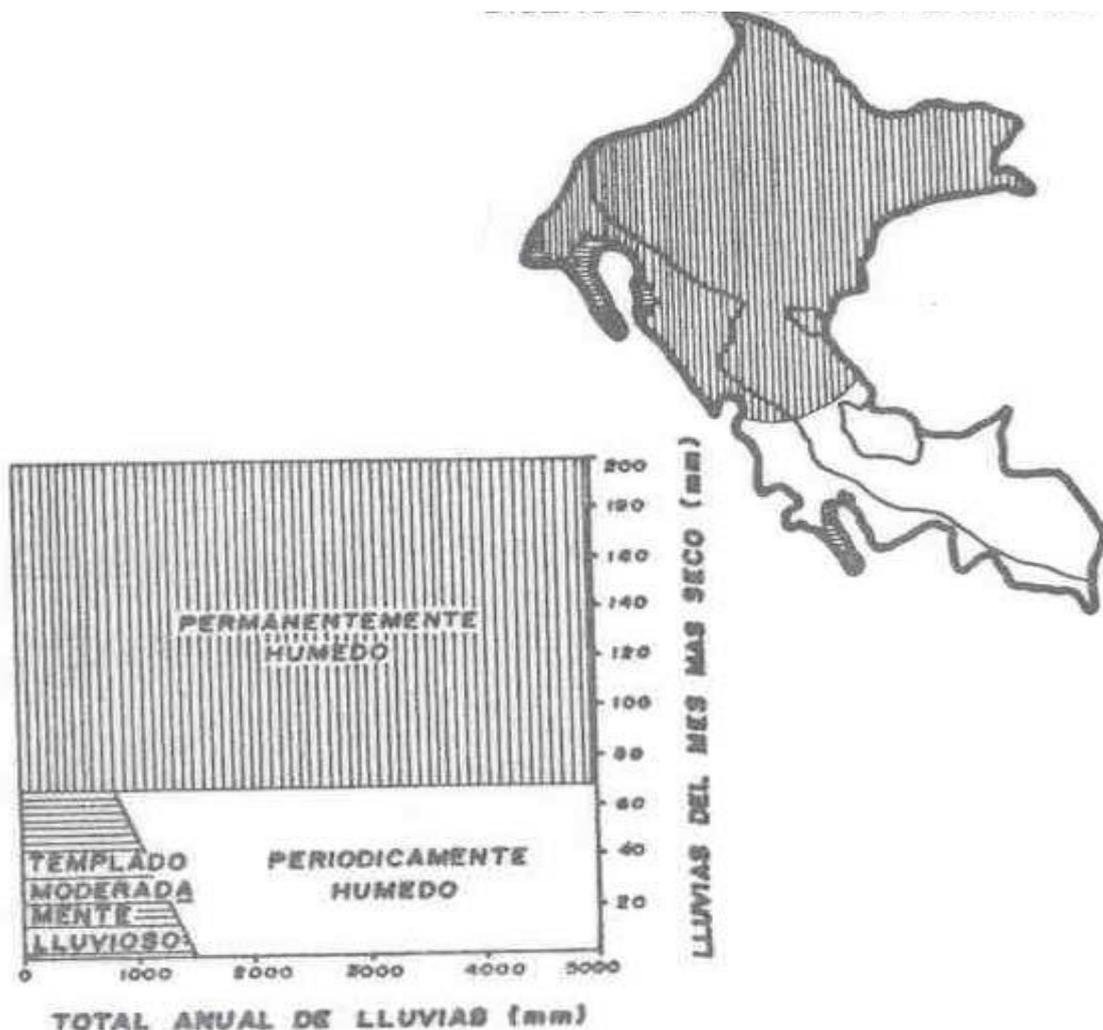


Figura 5.- Distribución del clima tropical de la selva del Perú

Fuente: A. Carrillo Gil

Según Carrillo (1997) “La composición química y mineralógica de las rocas es una de las principales características de la formación del suelo tropical, (...) En la selva alta predominan tanto los materiales residuales como los transportados, mientras que en la selva baja se encuentra el predominio de los materiales residuales.”

2.2.1. Suelos Lateríticos

Los suelos de comportamiento laterítico son considerados suelos superficiales que se forman a partir del proceso de laterización, meteorización tropical también llamada lixiviación, proceso que se da en condiciones bien drenadas, clima húmedo y tropical.

Los suelos lateríticos pueden ser residuales maduros o transportados y desde el punto de vista pedológico son suelos del horizonte B, de los grupos conocidos como oxisoles, ultisoles o suelos podzólicos, y tierras rojas estructuradas; el horizonte de estos suelos es principalmente de color rojo y/o amarillo, presenta entre dos y diez metros de espesor, y puede estar constituida principalmente por arenas o arcillas.

La composición mineralógica de las derivadas de arcillas presenta caolinita como el material predominante, y gran cantidad de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio; respecto a las derivadas de arenas, producen el cuarzo, minerales pesados, y agregados no disgregados.

Las propiedades y el comportamiento característico de los suelos lateríticos arcillosos son la aglomeración que forma terrones resistentes a la acción hídrica, y respecto a los arenosos, presentan vacíos intergranulares; por lo tanto los suelos de comportamiento laterítico presentan elevada porosidad aparente natural, alta permeabilidad, baja resistencia y capacidad de soporte, sin embargo cuando se encuentran bien compactados adquieren altas resistencias, baja permeabilidad, pequeña pérdida de capacidad de soporte por inmersión en agua, y pueden ser plásticos o poco plásticos. Asimismo, la combinación areno-

arcillosa bien compactada presenta mayor capacidad de soporte que las propias arcillas y variedades más arcillosas.

De acuerdo con Bernucci (1995), la distribución geográfica de los suelos lateríticos se encuentra en la faja intertropical del planeta, en regiones con climas favorables al intemperismo intenso y rápido, con altas temperaturas, ambiente húmedo, lluvias abundantes y filtración de agua. Perú se encuentra en la faja intertropical y presenta suelos lateríticos en las regiones de la selva (Figura 6).

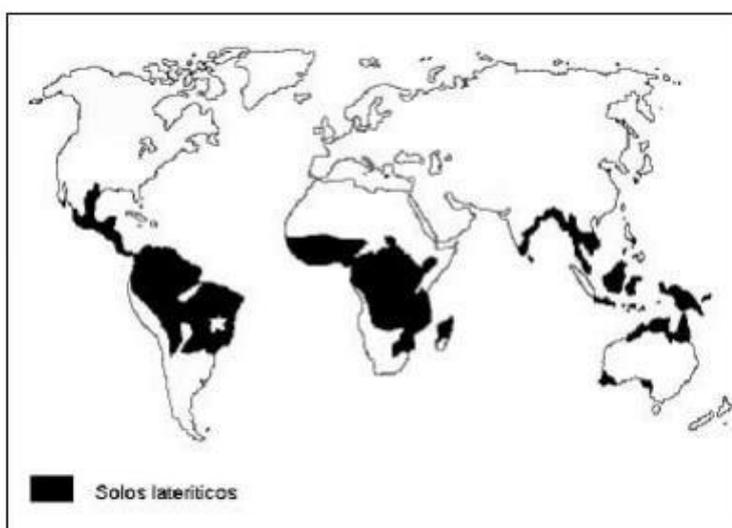


Figura 6.- Ubicación de los suelos lateríticos a nivel mundial.

Fuente: Charman, 1988 citado por Anversa, 2015.

2.2.2. Suelos Sapolíticos

Los suelos sapolíticos son considerados suelos residuales que se forman de la disgregación y/o descomposición de las rocas in situ conservando sus características de origen los cuales pueden ser del tipo arenoso, limoso y/o arcilloso.

A diferencia de los lateríticos, en los suelos sapolíticos se da la formación de pseudo-terrones en las superficies expuestas a la intemperie, esto es consecuencia de los constantes procesos de saturación y contracción por secado. Los espesores pueden variar desde centímetros hasta decenas

de metros. Los colores que presentan estos suelos son diversos: blanco, negro, gris, rosado, púrpura, verdoso, azulado, etc.

Por su heterogeneidad, la composición mineralógica es simple a muy compleja, presenta minerales parcialmente intemperizados y parte heredados de la roca matriz; los intemperizados presentan propiedades poco conocidas, son desde homogéneas e isotrópicas hasta altamente anisotrópicas, desde muy plásticos y expansivos de baja capacidad de soporte y altamente erosivas, hasta granulares de buena capacidad de soporte y resistentes a la erosión. Las variedades de arcillas saprolíticas pueden tener gran variedad de minerales, asimismo los limos pueden tener mineralogía muy variada como los macro cristales de caolinita y micas. La presencia de mica en las arenas saprolíticas pueden variar su comportamiento, así como también en los limos, le aporta mucha expansividad a los suelos.

En el Perú, los suelos tropicales en un gran porcentaje son del tipo saprolíticos, esto es, suelos arcillosos mezclados con limo y arena principalmente. (Carrillo-Gil, 1978).

2.3. METODOLOGÍA MCT

Miniatura Compacto Tropical (MCT) es una metodología, desarrollada por Nogami y Villibor, para el estudio de suelos tropicales, que involucra sistema de clasificación, procedimientos de caracterización y evaluación mecánica e hidrogeológica de los suelos.

Esta metodología brasilera incluye los procesos de estudio desarrollados exclusivamente para suelos tropicales. Los ensayos principales son Mini MCV, Pérdida de masa por inmersión, Mini Proctor, Mini CBR, expansión, permeabilidad, infiltrabilidad y contracción.

Respecto a los estudios geotécnicos de los suelos saprolíticos por la mecánica de suelos tradicional, estos presentan muchas dificultades, desde la obtención

de perfiles y muestreo hasta la interpretación de los ensayos. Debido a esto, en el pasado se sugirió incluso una Mecánica de Suelos Saprólíticos, hecho que no se concretó. Las características de las propiedades mecánicas e hidrogeológicas de estos suelos fueron considerados en los ensayos de la metodología MCT.

Según Nogami y Villibor (1995), la eficacia del método fue comprobada por el buen desempeño de más de 5000 km de caminos vecinales con base de suelo arenoso fino laterítico y más de 400 km de carreteras de tráfico pesado con base de suelo laterítico con brita discontinua.

2.3.1. Sistema de clasificación MCT

El sistema MCT fue desarrollado para la clasificación de suelos tropicales de acuerdo a sus comportamientos mecánicos e hidrogeológicos en suelos lateríticos y saprolíticos. Ambos tipos de suelos pueden coincidir en una misma clasificación de un sistema tradicional, por lo tanto el sistema de clasificación MCT permite diferenciar características como la naturaleza, composición y micro estructura de los suelos tropicales, que los sistemas tradicionales no lo permiten. Se realizaron cerca de media centena de muestras de suelos tropicales en Brasil para el desarrollo del sistema de clasificación MCT.

Los ensayos que se realizan para tal fin trabajan con especímenes de prueba de 50 mm de diámetro, por lo cual sólo se emplea suelos que pasan completamente, o en su mayoría, el tamiz de 2 mm de abertura.

La clasificación MCT se basa en el ábaco de la Figura 7, en cuyo eje de las abscisas están los valores de c' ; y en el eje de las ordenadas, los valores de e' . Los coeficientes e' se determinan a partir de los coeficientes de compactación d' y pérdida de masa por inmersión Pi , mediante la Ecuación 4.

$$e = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d}} \quad (4)$$

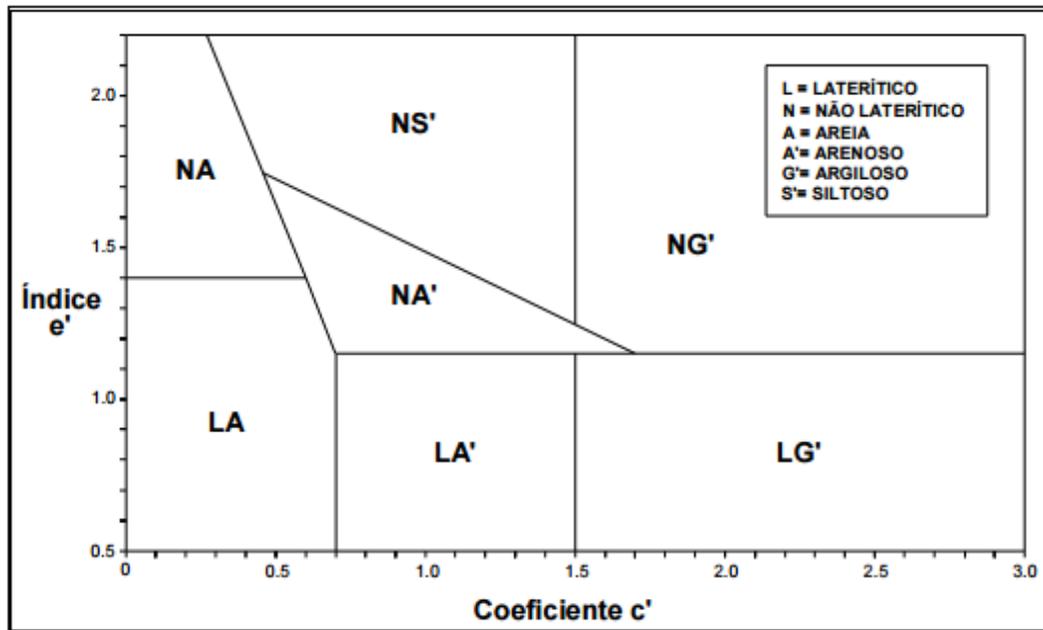


Figura 7.- Ábaco del sistema de clasificación MCT.

Fuente: Nogami y Villibor, 1981.

De acuerdo a la clasificación MCT, los suelos tropicales se dividen en dos grupos: lateríticos y saprolíticos; y siete subgrupos:

Suelos Lateríticos

- LA – arena laterítica cuarzosa,
- LA' – suelo arenoso laterítico,
- LG' – suelo arcilloso laterítico.

Suelos Saprolíticos

- NA – arenas, limos y mezclas de arenas y limos con predominio de granos de cuarzo y/o mica, no laterítico,
- NA' – mezclas de arenas cuarzosas con finos de comportamiento no laterítico,
- NS' – suelo limoso no laterítico,
- NG' – suelo arcilloso no laterítico.

2.3.2. Ensayos miniatura

Los ensayos que permiten en primera instancia caracterizar y clasificar los suelos tropicales son el Mini-MCV y Pérdida de masa por inmersión;

el ensayo correspondiente a la caracterización de compactación, es el Mini Proctor; y los que evalúan el comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos son los ensayos Mini CBR, Contracción, Infiltrabilidad, Permeabilidad y Expansión.

Mini – MCV

El ensayo de compactación “Moisture Condition Value”, propuesto por Parsons en 1976, se desarrolló con el objetivo de controlar las condiciones de compactación en Inglaterra, para lo cual empleó moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro y martillo de sección completa de 7kg. Posteriormente, Nogami y Villibor en 1980 adaptaron el ensayo para el estudio de suelos tropicales empleando especímenes de prueba de 50 mm de diámetro. Finalmente, en 1985 ellos mismos presentaron una variante que consiste en el empleo de especímenes de prueba de 26 mm, esta fue llamada S-MCV o Sub-MCV.

La preparación de muestra para el Mini-MCV consiste en primer lugar pasar el material por el tamiz de 2 mm abertura para luego separar cinco porciones que corresponden a humedades distintas con un rango ligeramente más amplio que el que se adopta generalmente en el ensayo de compactación tradicional.

Para la compactación se toma la porción de suelo con mayor contenido de humedad, se pesa 200 g (30 g en S-MCV), y se coloca en el molde de compactación, se adapta el martillo sobre la muestra para aplicar el primer golpe, luego se hace la lectura para determinar la altura A1 del espécimen empleando el extensómetro o dial con precisión de 0.01 mm. Se repite esta operación de medida después de los golpes sucesivos: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16,... n,... 4n; y culmina este procedimiento cuando:

- La diferencia entre mediciones sucesivas es menor a 0.1 mm;
- 4n llegue a 256 ó 96 para S-MCV;
- Existe clara evidencia de agua expulsada, según criterio del estudio.

a. Curvas de Mini-MCV o de deformabilidad, y Coeficiente c'

Las curvas de Mini-MCV se grafican para cada contenido de humedad, y se generan a partir de un plano en cuyas abscisas se encuentran los valores Mini-MCV a partir de la Ecuación 5:

$$\text{Mini-MCV} = 10 \times \log_{10} (B_i) \quad (5)$$

Donde **B_i** es el número de golpes; y en el eje de las ordenadas, los valores de “an” determinados por la Ecuación 6:

$$a_n = A_n - A_{4n} \quad (6)$$

Donde:

A_n : lectura de altura del espécimen después de n golpes;

A_{4n}: lectura de altura del espécimen después de 4n golpes;

a_n : diferencia de lectura de alturas.

Para la determinación del coeficiente *c'* se toma la curva que corresponde a un determinado contenido de humedad y se halla la intersección de la curva con la recta de la ecuación $a_n = 2 \text{ mm}$ ($a_n = 1 \text{ mm}$ en S-MCV).

Un coeficiente *c'* elevado por encima de 1.5, es característico de las arcillas y suelos arcillosos; los valores por debajo de 1.0, se relaciona con las arenas y limos no plásticos o poco cohesivos; y para los valores entre 1.0 y 1.5 son característicos de suelos con variedad granulométrica, pueden ser arenas limosas, arenas arcillosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, etc.

b. Curvas de compactación, y coeficiente d'

Las curvas de compactación se generan del cálculo de las densidades secas que se determinan con las alturas *A_n* de los especímenes. Cada curva corresponde a un número de golpes y se grafican en un plano

con el contenido de humedad en las abscisas, y densidad seca en las ordenadas.

El coeficiente d' se determina con la pendiente de la parte recta del lado seco de la curva de compactación correspondiente a los 12 golpes, y en las proximidades de la densidad seca máxima. Las densidades deben ser expresadas en kg/m^3 y las humedades en %.

Los valores de d' por encima de 20 corresponde generalmente a las arcillas lateríticas; y los valores menores de 20, y frecuentemente por debajo de 10, corresponden a las arcillas no lateríticas. Las arenas limpias también presentan un d' bajo, pero las arenas arcillosas tienen un d' elevado incluso mayor a 100. Los suelos saprolíticos limosos, micáceo y/o caoliníticos generalmente presentan un d' muy bajo, inferior a 5. Por tales relaciones se ve la importancia de este coeficiente en la clasificación de los suelos tropicales.

Pérdida de masa por inmersión (P_i)

El ensayo de Pérdida de masa por inmersión fue desarrollado con el fin de diferenciar el comportamiento de los suelos lateríticos de los saprolíticos, cuando surgen similitudes entre sus características relacionadas con el coeficiente de deformabilidad y/o compactación.

El ensayo se realiza con los especímenes compactados mediante el ensayo Mini-MCV, con fines de clasificación. A continuación, son parcialmente extraídos con la palanca de extracción hasta que sobresalgan 10 mm (5 mm para S-MCV) de los especímenes y son transportados al recipiente de inmersión que es llenado de agua después de colocar los especímenes de manera horizontal. Seguido de la inmersión en agua por 20 horas, se escurre el agua del recipiente y se colocan en el horno las cápsulas que contienen la parte rota de los especímenes para determinar las respectivas masas secas., las cuales son expresadas en porcentaje respecto a los pesos secos iniciales de la parte expuesta de los especímenes.

El valor del P_i se genera por interpolación gráfica al trazar la curva de variación de los porcentajes de pérdida de masa en función del Mini-MCV y buscando el valor correspondiente al Mini-MCV 10 ó 15, conforme se trate de un suelo de baja masa específica aparente (altura final de espécimen igual o mayor que 48 mm), o de elevada masa específica aparente (altura final menor que 48 mm).

Mini Proctor

Este ensayo se basa en la misma dinámica del Proctor tradicional pero en dimensiones menores. Consiste en fijar una energía de compactación (normal, intermedia o modificada) en cinco muestras con diferentes contenidos de humedad. Las energías de compactación se diferencian de acuerdo a las siguientes características:

- Energía normal: 5 golpes de martillo liviano, en cada cara.
- Energía intermedia: 6 golpes de martillo pesado, en cada cara.
- Energía modificada: 12 golpes de martillo pesado, en cada cara.

Mini CBR

Este ensayo se deriva del ensayo CBR, cuyo objetivo es determinar la capacidad de soporte. El ensayo Mini CBR fue desarrollado en la Universidad del Estado de Iowa (Lafleur et al, 1960), el valor obtenido se denominó IBV (Iowa Bearing Value), y se emplea especímenes de dimensiones reducidas, 50 mm de diámetro y el pistón de penetración de 16 mm de diámetro.

Nogami (1972) desarrolló adaptaciones en el método de Lafleur, con el objetivo de correlacionar sus resultados con el CBR tradicional. Las razones para desarrollar esas adaptaciones fueron las limitaciones del ensayo para la predicción del CBR en base a las propiedades índice de los suelos (granulometría y límites de consistencia). Posteriormente, se verificó que el Mini CBR permite flexibilidad en las variables que influyen en el valor de capacidad de soporte; de esta forma es posible determinar el soporte, sin inmersión en agua, con diversos tipos de sobrecargas, contenidos de humedad y energía de compactación, con láminas de agua

en el momento de la penetración, etc. Esto permite caracterizar mejor los suelos tropicales, sin aumentar mucho la cantidad de muestra a emplear, la energía y el costo para la ejecución de los ensayos.

Asimismo, Nogami (1972) desarrolló correlaciones del Mini CBR con el CBR, empleando los suelos más típicos del estado de Sao Paulo. Esas correlaciones fueron expresadas por las Ecuaciones 7 y 8:

$$\text{Log}_{10} (\text{Mini CBR1}) = -0.254 + 0.896 \times \text{log}_{10} C1 \quad (7)$$

$$\text{Log}_{10} (\text{Mini CBR2}) = -0.356 + 0.937 \times \text{log}_{10} C2 \quad (8)$$

Donde:

(Mini CBR1), (Mini CBR2): Mini CBR correspondientes a las penetraciones 2.0 y 2.5 mm, respectivamente.

C1, C2: Cargas (kgf) correspondientes a las penetraciones 2.0 y 2.5 mm, respectivamente.

Los valores de Mini CBR de los suelos lateríticos presentan características particulares de las cuales se resalta la pequeña diferencia de la capacidad de soporte con y sin inmersión en agua. Villibor (1981) propuso el valor $MS = 100 \times (\text{Mini CBR}_{inmerso} / \text{Mini CBR}_{sin inmersión})$ para caracterizar la reducción. Los suelos lateríticos arenosos generalmente presentan MS superiores a 50%.

Los suelos saprolíticos limosos, micáceos y/o caoliníticos o arenosos micáceos tienen características particulares en sus valores de Mini CBR, de las cuales se resalta el valor de soporte usualmente por debajo de los valores tradicionales; y también la notoria influencia de la sobrecarga patrón en el valor de soporte.

Expansión

El ensayo de expansión adoptado en el Mini CBR es similar al tradicional, con diferencia en el tiempo de sumergido que son sólo 20 horas y en las

adaptaciones de los equipos para el empleo de especímenes de dimensiones reducidas (50 mm de diámetro).

Los valores de expansión de los suelos lateríticos compactados con sus óptimos contenidos de humedad son relativamente pequeños, incluso en las arcillas y suelos arcillosos. Los valores no aumentan incluso para energías mayores a la intermedia.

La expansión de los suelos saprolíticos es rápida y acompañada por el desarrollo de presión de expansión relativamente baja. El valor de expansión es bajo debido a los bajos valores de LL e IP.

Infiltrabilidad

Se desconoce una designación estándar para la evaluación de esta propiedad de los suelos no saturados, el cual consiste en la cantidad de agua que penetra o infiltra a través de la superficie del suelo. La infiltrabilidad de agua se debe a la tensión de succión del suelo, aunque también es necesario considerar hinchamiento y presiones hidrostáticas.

Este ensayo no ha sido muy desarrollado en los estudios con fines de pavimentación, debido a que en los climas fríos y templados la infiltrabilidad pasa a tener poca importancia. Por otro lado, en las zonas tropicales húmedas, existen fuertes lluvias, intensa evaporación, y buen drenaje de los suelos lateríticos, por lo tanto la infiltrabilidad es el fenómeno más común que se da en obras viales

La infiltrabilidad se evidencia en la penetración de agua en zanjas de drenaje superficial no revestidas y capas del pavimento, por las bermas. Si la infiltrabilidad es alta, puede disminuir notoriamente la capacidad de soporte y/o deformabilidad del pavimento.

El ensayo de infiltrabilidad es elemental pero poco precisa; por lo cual, con el desarrollo de procedimientos cuantitativos de movimiento de agua

en medios no saturados, puede existir la necesidad de desarrollar ensayos más exactos.

Permeabilidad

En la actualidad, cuando se requiere conocer la propiedad de permeabilidad de los suelos con fines de pavimentación, se recurre a relacionarla con la granulometría y el grupo geotécnico a la que encaja el suelo. Sin embargo, la metodología MCT, presenta un método de ensayo que permite conocer esta propiedad de manera sencilla.

Los suelos lateríticos se caracterizan por tener alta permeabilidad, como consecuencia del desarrollo de agregados arcillosos, resistentes, incluso después de la inmersión en agua. Por otro lado, no se pueden hacer generalizaciones con la permeabilidad de los suelos saprolíticos, debido a que sus coeficientes de permeabilidad pueden variar desde lo más bajo hasta lo más alto, por las características heredadas por la roca matriz y las desarrolladas durante el intemperismo.

Contracción

De manera similar a los ensayos anteriores, existen varios procedimientos que se pueden emplear para la determinación de la contracción, no existiendo un estándar debido a que esta propiedad no es considerada muy importante en la geotecnia universal. Sin embargo, como se sabe, es necesario realizarlo para los suelos tropicales, principalmente cuando son arcillas o suelos arcillosos expansivos para pavimentación.

2.3.3. Otros métodos de estructuración de pavimentos

Los métodos no tradicionales de estructuración de pavimentos de la normativa brasilera fueron desarrollados a partir de los ensayos miniatura, quiere decir que los resultados obtenidos en dichos ensayos son parámetros necesarios en la estructuración de pavimentos. Por otro lado, estos métodos permiten el aprovechamiento del material propio de las zonas tropicales para la conformación de la sub rasante y capas del

pavimento, contribuyendo con la reducción de transporte de material de préstamo desde zonas alejadas y reducción del impacto ambiental durante la ejecución de los proyectos viales.

El método pionero en la normativa brasilera que cumple con lo mencionado en el párrafo anterior, es el método Suelo Arenoso Fino de comportamiento Laterítico (SAFL), y a partir de este método se presentan otros que involucran préstamo de material más granular y métodos de estabilización con cemento y cal.

Sub base o Base de Suelo Arenoso Fino de comportamiento Laterítico (SAFL)

El método SAFL define los criterios para estructuración, ejecución, aceptación y medición de base y sub base con suelo arenoso fino de comportamiento laterítico. Las bases y sub bases de SAFL están constituidas con suelos de los grupos LA, LA' y LG' de la clasificación MCT; presentan suelos finos con más del 50% retenido en el tamiz N° 200 (0.075 mm), y arenas de granos de cuarzo, que al ser compactados adecuadamente son estables.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

La metodología de investigación empleada es del tipo aplicada. Esta metodología (Figura 8) inicia con la toma de muestras correspondientes a los caminos seleccionados; se ensayan los suelos en laboratorio de acuerdo a la metodología tradicional y la metodología MCT con el fin de comparar los procedimientos y los resultados; se diseñan pavimentos con el método AASHTO 93 a partir de los resultados de los ensayos de ambas metodologías para comparar los espesores de la estructura; se propone una metodología de estudio de suelos que involucre un método estructuración de pavimentos y que permita el empleo del material propio de las zonas tropicales; y finalmente se determina la incidencia de la metodología MCT en el estudio.

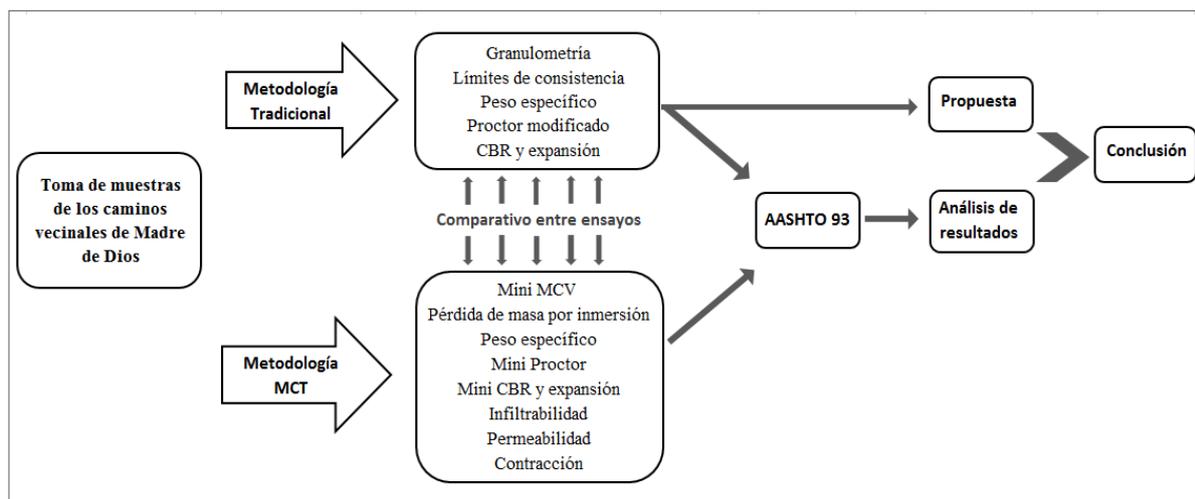


Figura 8.- Metodología de la investigación.

3.1. ETAPA 1 DE GABINETE

En esta etapa se da la recopilación y revisión bibliográfica relacionada con la metodología MCT a través de artículos, tesis, disertaciones, normativa brasilera, y dicha normativa traducida al español por la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones; se da el levantamiento bibliográfico referente a los suelos tropicales en el Perú; y a la normativa peruana vigente de ensayos de materiales, estudio de suelos y diseño de pavimentos.

Por otro lado se busca asesoramiento técnico para la operación de los equipos correspondientes a la metodología MCT instalados en el laboratorio de la Dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Se realizan ensayos de prueba para verificar las condiciones de los equipos y ajustar detalles para la óptima ejecución de los ensayos.

Finalmente se selecciona la zona de estudio para la toma de muestras, en este caso corresponden a los caminos vecinales de la región Madre de Dios:

- a) Dc. Km 166 – Tropezón (10.6 km),
- b) La Joya – Infierno (18 km).

Se identifican posteriormente como suelos M-1 y M-2, respectivamente.

3.2. ETAPA DE LABORATORIO

Esta etapa se da inicio con la recepción e identificación de las muestras de suelo, se extienden en una superficie plana en la intemperie con el fin de secar las muestras a temperatura de ambiente, cada cierto intervalo de tiempo se disgregan los terrones de suelo para uniformizar la humedad en toda la muestra y garantizar su adecuada trabajabilidad en los ensayos.

3.2.1. Metodología tradicional

Los ensayos correspondientes a la metodología tradicional se realizan en base al Manual de Ensayos de Materiales.

Análisis granulométrico por tamizado

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma MTC E 107-2000. Previamente al ensayo, se lavan los suelos M-1 y M-2 en la malla N° 200 para eliminar el material fino y conocer el porcentaje que este representa en la muestra. Se seca por 24 horas en el horno el material restante, luego se procede con el tamizado y el registro del peso del material que queda retenido en cada tamiz, se determinan los porcentajes que pasa para cada malla y finalmente se analiza la gradación de los elementos granulares.

Límites de consistencia

Los ensayos Límite Líquido, Límite Plástico y cálculo del Índice de Plasticidad se realizan de acuerdo a las normas MTC E 110 y 111 – 2000. Para la preparación de la muestra a ensayar se tamizan los suelos por la malla N° 40, y el material pasante se deja saturando de agua por 24 horas en un tarro con el nivel de agua ligeramente por encima de la muestra debido a que los suelos finos absorben gran cantidad de agua, mayor en comparación a los suelos granulares. Posteriormente, se realiza el ensayo Límite Plástico sobre el vidrio esmerilado e inmediatamente después el ensayo Límite Líquido con el equipo de la copa Casagrande, en ese orden debido a que es más práctico realizar incrementos en el contenido de agua a la muestra. Finalmente, los resultados que se obtienen en ambos ensayos permiten calcular por diferencia el Índice de Plasticidad.

Peso específico

La ejecución de este ensayo se realiza de acuerdo a la norma MTC E 113-2000. Se emplea la bomba de vacíos como sugiere la norma, y también se opta por el uso de un horno a 60°C para retirar los vacíos del suelo, al finalizar se promedian los resultados obtenidos por ambas secuencias.

Inicialmente, los suelos son secados completamente en el horno, luego se colocan 250 gr de suelo seco en la fiola y son saturados por 24 horas, posteriormente se retiran los vacíos con apoyo de la bomba de vacíos o el horno a 60°C, finalmente se pesa la fiola con el suelo dentro y con el agua a un nivel predeterminado.

Al culminar los cálculos obtenemos los valores del peso específico de los sólidos, los cuales son datos empleados en los cálculos del ensayo de compactación.

Proctor modificado

El ensayo de compactación con energía modificada se desarrolla para los suelos M-1 y M-2 de acuerdo a la norma MTC E 115-2000. El método del ensayo a emplearse que más se ajusta a las características de los suelos, es el método A, debido a que el material que pasa la malla N°4 en ambos suelos es mayor al 80%.

En la ejecución del ensayo por el método A se emplean 3 kg de muestras de suelo para cada porción de contenido de humedad específico, moldes de 4" de diámetro, y se efectúan 25 golpes con el pisón por cada capa, considerando que cada porción de suelo se compacta en 5 capas.

Para conseguir los óptimos contenidos de humedad (OCH) y las máximas densidades secas (MDS) requeridos, se construye una gráfica de humedad versus densidad seca, en forma de campana, con dos humedades bajas y dos altas.

CBR

Los ensayos CBR para los suelos M-1 y M-2 se realizan de acuerdo a la norma MTC E 132-2000. Los suelos son sometidos bajo tres energías diferentes de compactación que se generan con 13, 25 y 56 golpes por capa; los suelos compactados son humedecidos previamente con su OCH. Se sumergen 96 horas en el agua los suelos compactados, al culminar este tiempo los moldes son retirados del agua, se dejan escurrir durante 15 minutos y finalmente son trasladados a la prensa, en el cual se registran las lecturas del dial de los esfuerzos cuando el dial de las deformaciones de penetración presentan las siguientes lecturas: 0.63, 1.27, 1.90, 2.54, 3.17, 3.81, 5.08, 7.62, 10.16 y 12.70 mm.

En gabinete se realizan gráficas de esfuerzos versus penetraciones para la corrección de valores y obtener los esfuerzos que corresponden a las penetraciones 2.5 mm (0.1") y 5.0 mm (0.2"), como se muestra en la Figura 9.

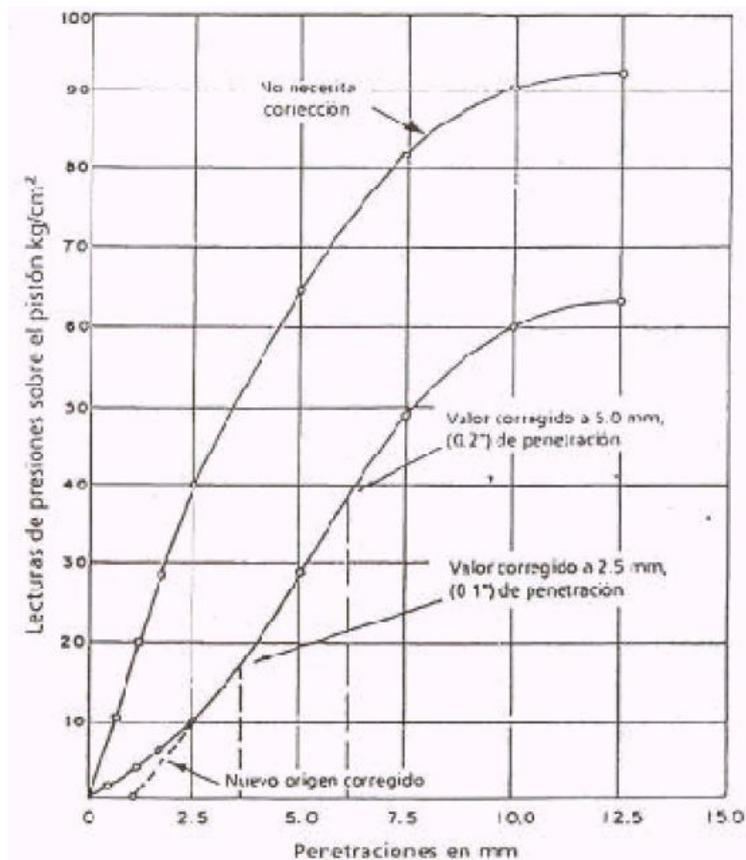


Figura 9.- Gráfico de esfuerzos vs penetraciones, y sus correcciones.
Fuente: MTC E 132-2000.

Los esfuerzos obtenidos se relacionan con los valores patrón, que son 70.31 y 105.46 kgf/cm^2 para las penetraciones 2.5 y 5.0 mm, respectivamente. Los porcentajes que representan los esfuerzos obtenidos en el ensayo respecto a los esfuerzos patrón, son los valores de CBR.

Expansión

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma MTC E 132-2000, en donde se indica que antes de sumergir el molde con el suelo compactado, se coloca una placa perforada con vástago y los anillos necesarios sobre el suelo compactado para generar una sobrecarga no menor de 4.54 kg. Inmediatamente después de sumergir todo lo indicado, se realiza la lectura inicial del dial con apoyo de un trípode y la punta del dial sobre el vástago. El suelo es sumergido por 96 horas, se realizan lecturas del

hinchamiento durante este periodo de la misma forma que se realiza la lectura inicial. Finalmente, se calcula el porcentaje de expansión respecto a la altura inicial del suelo sumergido.

3.2.2. Metodología MCT

Los ensayos miniatura corresponden a la metodología MCT, los mismos que se ejecutan con muestras de suelos que pasan el tamiz N°10 de 2 mm de abertura. Para conseguir la adecuada trabajabilidad de los suelos, en primer lugar, las muestras recepcionadas en el laboratorio son extendidas y expuestas a la intemperie para el secado; a medida que las muestras consiguen una humedad próxima a la higroscópica, se disgregan los terrones y se homogeniza el material; este proceso de secado también se puede realizar con el empleo de un horno a 60°C.

Mini MCV

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma brasilera DNER-ME 258/94; para el cual es necesario 2500 gr del material pasante del tamiz N°10 (2 mm); se preparan cinco porciones de 500 gr con distintos contenidos de humedad, cuyas diferencias entre humedades son crecientes hasta 5%, de tal forma que permita el trazo completo de las curvas de compactación; estas muestras son colocadas en un ambiente de temperatura constante por 24 horas para homogenizar la humedad en toda la muestra.

Antes de realizar la compactación, se calcula la constante de calibración con el cilindro patrón, mediante la Ecuación 9, con el fin de determinar una altura patrón con el cual se determinarán las alturas variables del suelo.

$$Ka = Ac \pm La \quad (9)$$

Donde,

Ac = Altura del cilindro patrón en 0.01 mm, medido con el vernier o un instrumento con la precisión requerida.

L_a = Lectura del dial en 0.01 mm. El signo positivo se emplea cuando la cabeza del dial se encuentra hacia abajo, y el signo negativo en el caso contrario.

Se pesan 200 gr del material de suelo y se coloca dentro del molde ya ubicado en el equipo; se nivela la superficie del suelo con pequeños apisonamientos rotativos; se coloca el papel filtro y luego el martillo tipo ligero sobre el suelo del molde; se registra la primera lectura del dial, y se reinicia el contador de vueltas; se da el primer golpe e inmediatamente después la lectura de dial; se dan golpes sucesivos y se efectúan las lecturas de dial, como se muestra en la Figura 10, en los siguientes números de golpes: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, ... n ... 4n. Este proceso culmina cuando: la diferencia entre dos lecturas consecutivas es negativo o menor que 0.01 mm, existe drenaje considerable de agua en la parte superior e inferior de la muestra del molde, y/o el número de golpes llega a 256.



Figura 10.- Lectura del dial en ensayo Mini-MCV.

Al culminar la compactación con la última lectura del dial, se pesa el molde con el suelo compactado; se coloca nuevamente de forma invertida en el equipo; y finalmente con ayuda del extractor de muestras, se mueve la muestra hasta donde se requiera. Todo el procedimiento se realiza para las cinco porciones de suelo humedecidas.

Los cálculos que corresponden a este ensayo se realizan para determinar el contenido de humedad de las cinco porciones de suelo; diferencias de altura de la muestra a diferentes números de golpes; densidad aparente seca del suelo compactado. Esto permite conocer los coeficientes de deformabilidad y de compactación de los suelos.

Pérdida de masa por inmersión

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma brasilera DNER-ME 256/94. El procedimiento inicia con la extracción del suelo obtenido en la compactación Mini-MCV. Para esto se emplea el extractor del equipo, de manera que la parte que estuvo en contacto con el martillo sobresalga 10 mm; se retiran los filtros; y luego el molde con la muestra es llevado al recipiente de inmersión. El molde con la muestra es colocado de manera horizontal, como se muestra en la Figura 11, de tal forma que la cápsula de aluminio se coloque a la altura de la muestra expuesta. El recipiente se llena de agua hasta cubrir por lo menos 1 cm la superficie externa del molde; después de 20 horas sumergido, se retira el agua del recipiente y se retira el molde conservando la posición horizontal para evitar escurrimiento del suelo. La cápsula de aluminio se coloca en el horno para el respectivo secado y determinación de la cantidad de suelo perdido. Este procedimiento se repite para las cinco porciones compactadas en el ensayo Mini-MCV.



Figura 11.- Ensayo de Pérdida de masa por inmersión en agua.

La Ecuación 10 determina la pérdida de masa por inmersión **Pi**:

$$Pi = \frac{W_d}{W_o} \times 100 \quad (10)$$

Donde,

W_d = Peso del suelo compactado, seco y desprendido en la cápsula de aluminio.

W_o = Masa de suelo seco que corresponde a los 10 mm expuestos.

Los valores Pi de cada porción del suelo permiten crear una curva en función al Mini-MCV, y el resultado será el valor correspondiente al Mini-MCV = 10.

Peso específico

Se realiza el ensayo tradicional y con las dos formas de extracción de vacíos ya explicadas anteriormente, como muestra la Figura 12. En este caso se emplea muestra que pasa el tamiz N°10 de 2 mm, con fines de comprobación.

Los pesos específicos de los sólidos obtenidos son necesarios para su empleo en el ensayo de compactación Mini Proctor.

Mini Proctor – energía intermedia

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma brasilera DNER-ME 228/94. La preparación de muestra en cinco porciones de 500 gr es similar al ensayo Mini-MCV. En este caso la compactación se realiza con energía intermedia, como muestra la Figura 12, quiere decir que se emplea el martillo tipo pesado y se aplica seis golpes en cada cara de la muestra, para lo cual se debe invertir el molde en el momento requerido. La cantidad de suelo a compactar que se coloca en el molde debe ser tal que se consiga una altura final del suelo compactado, cercano o igual a la altura del cilindro patrón (50 mm). En el caso que no se logre la altura

deseada se corrige la cantidad de muestra a compactar y se repite el procedimiento con la muestra restante.



Figura 12.- Ensayo Mini Proctor.

Respecto a los cálculos del ensayo, antes de realizar la compactación se determina la constante de calibración con el cilindro patrón de igual manera al realizado en el ensayo Mini-MCV. Luego la Ecuación 11 determina la altura del espécimen compactado, en milímetros:

$$A = Ka \pm Le \quad (11)$$

Donde,

Ka = Constante de calibración, en 0.01 mm.

La = Lectura del dial en 0.01 mm. El signo negativo se emplea cuando el dial está colocado con la cabeza hacia abajo.

Para determinar la cantidad de muestra corregida a compactar, con el fin de conseguir la altura requerida, se emplea la Ecuación 12:

$$Mc = \frac{Mi \times Ac}{A} \quad (12)$$

Donde,

M_i = Masa empleada en la compactación, cuya altura resulta A.

M_c = Masa corregida a compactar, para alcanzar la $A_c \pm 1$ mm.

Posteriormente, el procedimiento para determinar el óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca a partir de las cinco porciones se realizan de igual manera que el ensayo tradicional,

Mini CBR

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma brasilera DNER-ME 254/97. Previamente, la muestra debe ser compactada de acuerdo a la norma DNER-ME 228/94 con el óptimo contenido de humedad calculado en dicho ensayo. Este suelo compactado debe ser movido del molde hasta que el suelo coincida con el nivel de la base del molde. El ensayo Mini CBR se realiza en las siguientes variantes: embebido con sobrecarga, y sin embebido con sobrecarga; para lo cual se requiere compactar una porción para cada variante de Mini CBR.

Para el caso *Mini CBR embebido con sobrecarga*, se retiran los papeles filtro de la muestra compactada, se coloca un nuevo papel filtro sobre la placa base del sistema de embebido, y sobre esta se coloca el molde con la muestra. Se coloca un papel filtro sobre la muestra compactada, y sobre esto se coloca el disco perforado que va con un vástago vertical. Se coloca la sobrecarga anular, la placa superior del sistema de embebido y se ajustan los tornillos sujetadores.

Todo el sistema se coloca en el recipiente de inmersión, luego se llena de agua hasta que el nivel del agua se encuentre por lo menos 5 mm por encima de la placa superior del sistema. Esta parte del procedimiento se realiza principalmente para determinar la expansión del suelo, el cual se continúa describiendo más adelante.

Luego de 20 horas de inmersión del sistema en el agua, se retira del recipiente y se coloca el molde levemente inclinado para escurrir

alrededor de 15 minutos. Se mantiene en reposo la muestra compactada al menos por una hora.

Se transfiere el molde con la muestra compactada y el peso anular, sobre el plato de la prensa; elevar el plato hasta que el pistón de 16 mm de diámetro haga contacto con la muestra. Girar la manivela de la prensa hasta que el dial de carga empiece a marcar valores. Ajustar el dial de penetración, como muestra la Figura 13, y girar la manivela a una velocidad de penetración de 1.0 mm/min. Realizar lecturas del dial de anillo de carga correspondientes a las penetraciones: 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm, 1.25 mm, 1.50 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 3.5 mm, 4.0 mm, 4.5 mm y 5.0 mm.



Figura 13.- Ajuste del dial de penetración, ensayo Mini CBR.

Para el caso *Mini CBR sin embebido con sobrecarga*, se omiten los pasos que corresponden a la inmersión en agua del suelo compactado descrita en la variante anterior.

El cálculo del Mini CBR en ambas variantes consiste en calcular las cargas, en kilogramo-fuerza, que corresponden a las lecturas realizadas en el anillo de carga. Para ello, se grafica una curva media a partir de las cargas en función a las penetraciones; se corrigen irregularidades de la curva y se procede a calcular el Mini CBR.1 (penetración a 2.0 mm) y el Mini CBR.2 (penetración a 2.5 mm) mediante las fórmulas mencionadas

en el marco teórico. El valor final de Mini CBR de la muestra, en la variante adoptada, será el mayor valor obtenido.

Expansión

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma brasilera DNER-ME 254/97. El procedimiento se inicia en el ensayo Mini CBR del tipo embebido. El molde con la muestra compactada se coloca en el sistema de embebido y todo este conjunto es colocado en el recipiente de embebido; se registra la lectura del dial correspondiente a la altura en la que se encuentra el vástago vertical; se llena el recipiente hasta que el nivel del agua se encuentre 5 mm por encima de la parte superior del sistema de embebido. Después de las 20 horas de inmersión, se realiza la lectura del dial como se muestra en la Figura 14; finalmente se retira el sistema de embebido y se continúa con el ensayo Mini CBR.



Figura 14.- Última lectura del dial, ensayo de Expansión.

Para el cálculo del porcentaje de expansión del suelo se emplea la Ecuación 13:

$$E = \frac{L_f \times L_i}{A_i} \times 100 \quad (13)$$

Donde,

E = Porcentaje de expansión aproximado a 0.1.

L_i = Lectura inicial del dial en milímetros, con aproximación a 0.01.

L_f = Lectura final del dial en milímetros, con aproximación a 0.01.

A_i = Altura inicial de la muestra compactada, en milímetros, con aproximación a 0.01.

Infiltrabilidad

Las muestras de suelos son compactadas previamente para la ejecución de este ensayo. Inmediatamente después de la compactación, con el extractor se mueve el espécimen hasta que coincida con la base del molde. El molde con la muestra compactada se coloca sobre la placa de piedra porosa y todo sobre el recipiente que contiene el nivel de agua inferior. Este recipiente presenta un conector, como se observa en la Figura 15, en el cual se coloca un tubo flexible con el fin de que permita el paso del agua que viene desde la bureta de vidrio, previamente llenada. La bureta de vidrio presenta una llave de paso, y se coloca en posición horizontal a nivel de la cara superior de la piedra porosa para que la infiltrabilidad sea netamente por la capacidad de absorción del suelo, sin presión adicional del agua.



Figura 15.- Ensayo de Infiltrabilidad.

Para determinar el coeficiente de absorción se construye un gráfico de lecturas (L) en las ordenadas versus $t = \sqrt{\text{tiempo en minutos}}$ en las abscisas. El tiempo inicia en cero cuando la bureta está llena, luego en los tiempos $t= 1, 2, 4, 8, 16, n$ en minutos se efectúan las lecturas L1, L2, L3... en milímetros, en la bureta. Finalmente, el coeficiente de absorción se calcula con la Ecuación 14:

$$S = \frac{(Lb-La) \times S}{10 \times (tb-ta) \times A} \quad (14)$$

Donde,

S = Coeficiente de absorción, en cm/\sqrt{min} .

La, ta = Coordenadas del punto a de la parte recta de la curva.

Lb, tb = Coordenadas del punto b de la parte recta de la curva.

S = Sección de la bureta horizontal, en cm^2 .

A = Sección del espécimen de prueba, en cm^2 .

Permeabilidad

La muestra de suelo se compacta según se requiera. Este ensayo se realiza con especímenes que son previamente ensayados por infiltrabilidad y saturados por contrapresión; se sumerge el molde con suelo compactado en agua hasta que una lámina de agua se forma en la superficie del espécimen. El molde con la muestra es colocada sobre una placa de piedra porosa saturada de agua y por la parte superior del molde se deja caer el agua desde una bureta colocada en posición vertical, como se muestra en la Figura 16. Se registran los niveles de agua en milímetros y sus respectivos tiempos en minutos.



Figura 16.- Ensayo de Permeabilidad.

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad se emplea la Ecuación 15:

$$k = \frac{2.3 \times A \times C_b \times \log_{10} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)}{10 \times 60 \times S \times t} \quad (15)$$

Donde,

k = Coeficiente de permeabilidad, en *cm/seg.*

A = Altura del espécimen de prueba, en cm.

C_b = Área de la sección de la bureta vertical, en *cm².*

T = Intervalo de tiempo, en minutos, del recorrido entre las lecturas H1 y H2.

H1, H2 = Altura de los niveles de agua, en milímetros, en el tramo rectilíneo de la curva.

S = Sección del espécimen de prueba, en *cm².*

Contracción

El espécimen obtenido en la compactación, es retirado completamente del molde. Se coloca dicho espécimen sobre una placa de piedra porosa y sobre la cara superior del espécimen otra piedra porosa. Este conjunto es colocado en el dispositivo de medida de contracción, adecuadamente centrado tal que la punta del dial se apoye sobre el centro de la piedra porosa. Se registran diariamente las lecturas del dial y los tiempos respectivos, en horas y minutos, hasta que las variaciones sean insignificantes o ya no se den. Se deja este conjunto en reposo, en un ambiente protegido de viento y exceso de polvo. (Figura 17)



Figura 17.- Ensayo de Contracción.

Para determinar la contracción del suelo se emplea la Ecuación 16:

$$C = \frac{L_i - L_f}{A_i} \times 100 \quad (16)$$

C = Porcentaje de contracción aproximado a 0.1.

L_i = Lectura inicial del dial en milímetros, con aproximación a 0.01.

L_f = Lectura final del dial en milímetros, con aproximación a 0.01.

A_i = Altura inicial de la muestra compactada, en milímetros, con aproximación a 0.01.

3.3. ETAPA DE GABINETE 2

3.3.1. Comparativo de ensayos tradicionales y miniatura

El comparativo entre los ensayos de ambas metodologías se realiza con el fin de encontrar las ventajas y desventajas del empleo de ambas en los estudios de suelos tropicales con fines de pavimentación, y a partir de ello determinar la metodología más apropiada para estos fines.

El primer análisis se basa en comparar los criterios y resultados de ambas metodologías en la caracterización, clasificación, compactación, y comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos tropicales.

El segundo análisis consiste en comparar la cantidad de suelo y el tiempo empleado en los ensayos. A partir de estos resultados, se estima el comparativo de los mismos parámetros para el estudio de un kilómetro de carretera.

Finalmente se realiza un análisis para determinar la incidencia de los ensayos miniatura en el estudio de suelos tropicales a nivel de laboratorio.

3.3.2. Estructuración de pavimentos – método AASHTO 93

Con los resultados obtenidos en los ensayos CBR y Mini CBR se diseñan pavimentos de acuerdo al método AASHTO 93, método asimilado por la

normativa peruana. Los valores de CBR obtenidos a partir de los valores de Mini CBR se generan con las ecuaciones propuestas por Nogami (1972), que consisten en correlaciones desarrolladas según el tipo de suelo por el sistema de clasificación MCT. Respecto a los ejes equivalentes acumulados asumidos son 100 000, 250 000 y 500 000 EE de tráfico generado. Por otro lado, los coeficientes estructurales asumidos son considerados de acuerdo a la normativa, en el cual se indica que para una superficie de rodadura con tratamiento superficial bicapa no se considera coeficiente estructural por no tener aporte, por tal motivo sólo se consideran como coeficientes estructurales para las bases granulares y las sub bases granulares, valores de 0.052/cm y 0.047/cm respectivamente,

Se realiza un comparativo de dimensiones correspondientes a los pavimentos estructurados a partir de los ensayos CBR y Mini CBR.

3.3.3. Propuesta metodológica para estudio y estructuración de pavimentos con suelos tropicales

Se analizan los resultados de la metodología MCT, que involucra ensayos específicos para estudio de suelos tropicales, correspondientes a la caracterización, compactación y evaluación del comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos. Se busca las ventajas del estudio con esta metodología tanto en la precisión de los resultados como en la parte operativa de los equipos. Se evalúa el método brasileño SAFL de estructuración de pavimentos que emplea los resultados de la metodología MCT y permite el uso del material propio de las zonas tropicales.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. MÉTODOS TRADICIONALES

4.1.1. Ensayos de caracterización, y clasificación de suelos

Los resultados de los ensayos correspondientes a los límites de consistencia y al peso específico de los sólidos realizados para los dos suelos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1
Peso específico de los sólidos y límites de consistencia

Suelo	γ (gr/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M-1 (Arcilla arenosa de baja plasticidad)	2.687	34	18	16
M-2 (Arcilla de baja plasticidad)	2.772	46	22	24

Nota: γ = peso específico de los sólidos; LL= límite líquido; LP= límite plástico; IP= índice de plasticidad

Los suelos M-1 y M-2 presentan IP de 16 y 24% respectivamente. De acuerdo a la clasificación de suelos por el índice de plasticidad, el M-1 es un suelo arcilloso de plasticidad media; y el M-2, suelo muy arcilloso de plasticidad alta, esto es un indicio de que los suelos presentan sensibilidad al agua, por lo cual no es favorable su uso como conformación de sub rasante y estructura del pavimento. Los LL de los suelos M-1 y M-2 son 34 y 46% respectivamente; y sus LP son 18 y 22% respectivamente.

Los pesos específicos de los sólidos correspondientes a los suelos presentan valores elevados, 2.687 gr/cm³ para el suelo M-1 y 2.772 gr/cm³ para el M-2.

Por otro lado, la granulometría y clasificación de los suelos por los sistemas SUCS y AASHTO se presentan en la Tabla 2. Ambos suelos están compuestos principalmente por partículas finas en las cuales se consideran los limos y las arcillas.

Tabla 2
Granulometría y Clasificación de suelos

Suelo	Contenido (%)					Clasificación	
	Grava	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Finos	SUCS	AASHTO
M-1	0	0	1	43	56	CL	A-6 (6)
M-2	0	0	0	3	97	CL	A-7-6 (26)

Nota: Grava= 75mm a 4.75mm; arena gruesa= 4.75mm a 2mm; arena media= 2mm a 0.425mm; 0.425mm a 0.075mm; finos< 0.075mm.

La granulometría obtenida del suelo M-1 está compuesto por 56% de elementos finos y 43% de arena fina, cuya diferencia es pequeña. Por el contrario, la diferencia es mayor en el suelo M-2, que está compuesto por 97% de finos lo cual indica que carece de elementos granulares.

El sistema SUCS denomina al suelo M-1 como CL y lo describe como una arcilla arenosa de baja plasticidad; el suelo M-2 es denominado CL y descrito como arcilla de baja plasticidad. El sistema AASHTO clasifica a los suelos M-1 y M-2 como A-6 (6) y A-7-6 (26) respectivamente, los cuales son considerados como suelos arcillosos y de insuficiente calidad para sub rasante.

4.1.2. Ensayos Proctor modificado, CBR y expansión

Los OCH de los suelos M-1 y M-2 son 10.3 y 17.6% respectivamente, con los cuales se obtienen unas MDS de 1.919 y 1.79 gr/cm³ respectivamente. Estas características de compactación y los valores de CBR y expansión se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3
Proctor modificado, CBR y expansión

Suelo	Proctor modificado		CBR (%)	Expansión (%)
	OCH (%)	MDS (gr/cm ³)		
M-1	10.3	1.919	8.1	0.05
M-2	17.6	1.790	4.9	0.16

Nota: OCH= Óptimo contenido de humedad; MDS= Máxima densidad seca.

Los CBR resultantes a 95% de las MDS son 8.1% para el suelo M-1 y 4.9% para el suelo M-2. Por otro lado, después de 72 horas sumergidas en agua, el valor de expansión del suelo M-1 es 0.05% y del suelo M-2 es 0.16%.

4.2. METODOLOGÍA MCT

4.2.1. Ensayos Mini MCV y Pérdida de masa por inmersión

El ensayo Mini-MCV en el suelo M-1, como se observa en la Tabla N° 4. Sólo alcanzó la compactación hasta 256 golpes en los dos primeros puntos correspondientes a las humedades más bajas; y en los puntos restantes presentó tanto variaciones irregulares en las alturas del suelo como pérdida de material fuera del molde durante la compactación, por los cuales se registraron un número de golpes menor a los anteriores. El número de golpes empleado se reduce a medida que el suelo presenta mayor contenido de humedad. Asimismo, como también se observa en la Figura 18, la variación de alturas *an* se reduce con mayor prontitud a medida que el suelo contiene mayor humedad, por lo cual la pendiente absoluta de las curvas de deformabilidad tiende a aumentar. El coeficiente resultante de deformabilidad “c” del suelo M-1 es 1.45.

La Tabla 4 y la Figura 19 presentan resultados referentes a las curvas de compactación del suelo M-1. Las densidades de las curvas correspondientes a los 6, 8, 12 y 16 golpes se reducen aproximadamente a partir del 18.9% de humedad; y las densidades de las demás curvas se reducen en menores humedades. El coeficiente resultante de compactación “d” del suelo M-1 es 20.

La pérdida de masa por inmersión del suelo M-1 es 106%, cuyo valor se genera en la intersección de la curva y el eje correspondiente al Mini-MCV=10, como se muestra en la Figura 20.

Tabla 4
Mini MCV y Pérdida de masa por inmersión del M-1

ENSAYO DE COMPACTACIÓN MINI-MCV/M-1															
MOLDE N°	A			B			C			D			E		
MASA SUELO HÚMEDO COMPACTADO, gr	196,5			199,4			199,2			196,8			188,7		
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	5,4			9,1			13,9			18,9			23,8		
MASA SUELO SECO COMPACTADO, gr	186,4			182,8			174,9			165,5			152,4		

N° GOLPES	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm³)
1	71,89	7,17	1,321	71,20	8,11	1,307	68,30	7,95	1,304	65,06	9,13	1,296	58,63	7,66	1,324
2	67,53	6,72	1,406	67,60	8,18	1,377	64,06	8,08	1,390	59,54	9,15	1,416	53,50	2,69	1,451
3	65,86	6,53	1,442	64,42	8,37	1,445	62,04	8,71	1,436	57,50	9,40	1,466	51,38	0,74	1,511
4	64,72	6,40	1,467	63,09	8,17	1,475	60,35	8,63	1,476	55,93	7,97	1,507	50,97		1,523
6	62,94	6,29	1,509	61,07	7,77	1,524	57,82	8,72	1,540	52,39	4,49	1,609	50,89		1,525
8	60,81	5,30	1,561	59,42	7,17	1,567	55,98	8,71	1,591	50,39	2,56	1,673	50,81		1,528
12	59,33	4,75	1,600	56,05	5,26	1,661	53,33	7,26	1,670	48,10		1,753	50,64		1,533
16	58,32	4,38	1,628	54,92	4,83	1,695	51,72	6,04	1,722	47,96		1,758			
24	56,65	3,29	1,676	53,30	4,64	1,746	49,10	3,70	1,814	47,90		1,760			
32	55,51	2,52	1,710	52,25	3,93	1,781	47,27	1,98	1,884	47,83		1,762			
48	54,58	2,19	1,740	50,79	2,93	1,833	46,07		1,933						
64	53,94	2,09	1,760	50,09	2,43	1,858	45,68		1,950						
96	53,36		1,779	48,66		1,913	45,40		1,962						
128	52,99		1,792	48,32		1,926	45,29		1,967						
192	52,39		1,812	47,86		1,945									
256	51,85		1,831	47,66		1,953									

CÁPSULA N°	01	02	03	04	05
ALTURA EXPUESTA, mm	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
VOLUMEN EXPUESTO, cm³	19,63	19,63	19,63	19,63	19,63
MASA SUELO SECO EXPUESTO, gr	35,95	38,35	38,62	34,60	30,10
MASA SUELO SECO DESPRENDIDO + TARA, gr	150,90	155,00	155,40	100,30	99,30
TARA, gr	65,80	65,20	65,20	65,90	66,70
MASA SUELO SECO DESPRENDIDO, gr	85,10	89,80	90,20	34,40	32,60
PÉRDIDA DE MASA POR INMERSIÓN, %	236,70	234,20	233,50	99,40	108,30

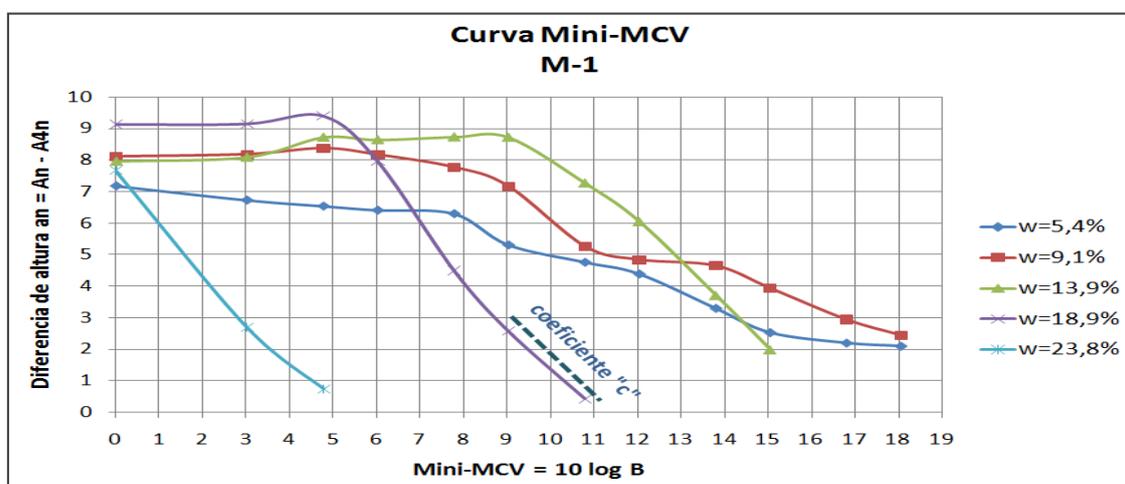


Figura 18.- Curvas de deformabilidad del suelo M-1.

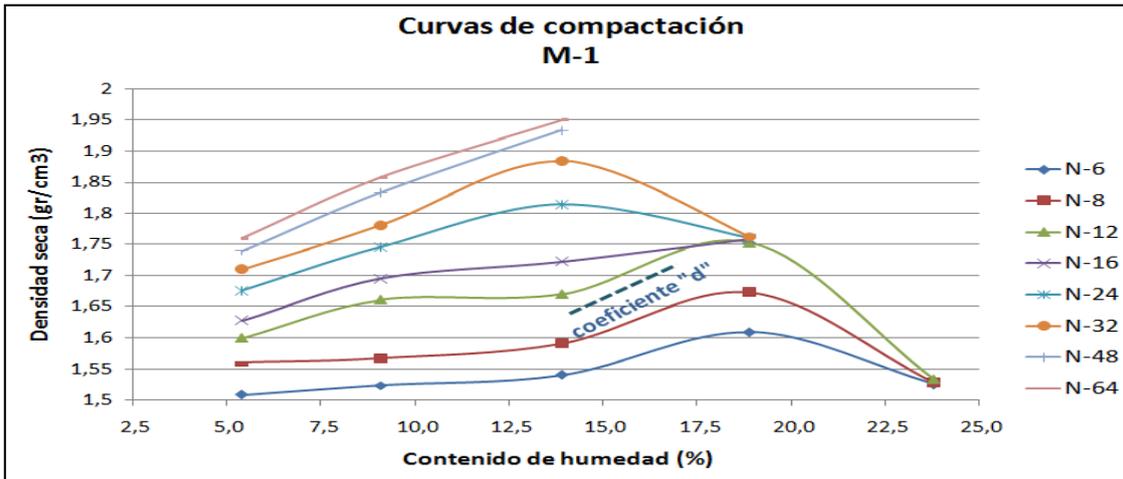


Figura 19.- Curvas de compactación del suelo M-1.

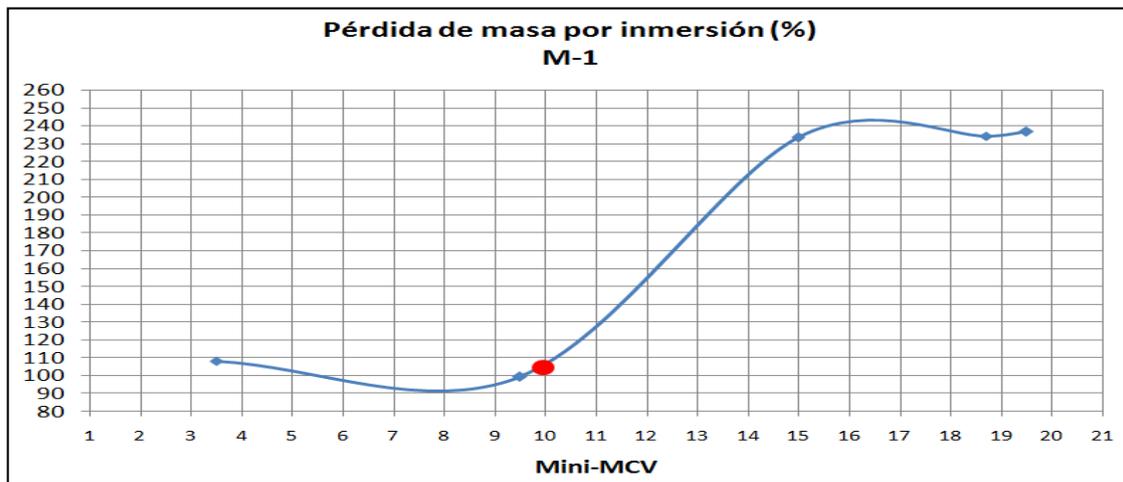


Figura 20.- Curva de Pérdida de masa por inmersión del suelo M-1.

En la compactación Mini-MCV para el suelo M-2 se completaron los 256 golpes para los cuatro primeros puntos y para el 24.1% de humedad se generaron irregularidades en las alturas del suelo, cuyos valores se muestran en la Tabla N° 5.

El coeficiente de deformabilidad "c" del suelo M-2 es 1.52, mayor que del suelo M-1 debido a la mayor pendiente de la curva (Figura N° 21).

En la Figura N° 22 se observa que las densidades secas de todas las curvas de compactación del suelo M-2 decrecen a partir del 18.8% aproximadamente de humedad. Asimismo, las pendientes del ramo

izquierdo de las curvas son menores que las del suelo M-1. El coeficiente de compactación “d” del suelo M-2 es igual a 15.

La pérdida de masa por inmersión del suelo M-2 es 89%, cuyo valor es menor que la del suelo M-1, y es generado en la intersección del eje Mini-MCV=10 y la prolongación de la curva (Figura N° 23).

Tabla 5
Mini MCV y Pérdida de masa por inmersión del M-2

ENSAYO DE COMPACTACIÓN MINI-MCV/M-2															
MOLDE N°	A			B			C			D			E		
MASA SUELO HÚMEDO COMPACTADO, gr	199,2			198,7			199,5			199,0			195,3		
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	4,5			9,6			14,3			18,8			24,1		
MASA SUELO SECO COMPACTADO, gr	190,6			181,3			174,5			167,5			157,4		
N° GOLPES	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)	Altura A (mm)	an (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)
1	72,16	5,09	1,345	71,07	5,31	1,299	70,17	5,98	1,267	69,59	8,11	1,226	71,81	11,45	1,116
2	69,70	5,14	1,393	68,37	5,60	1,350	67,37	6,78	1,319	65,40	8,25	1,304	66,57	11,84	1,204
3	68,09	5,17	1,426	66,91	5,70	1,380	65,55	7,23	1,356	63,12	8,51	1,352	62,92	10,89	1,274
4	67,07	5,14	1,447	65,76	5,60	1,404	64,19	7,29	1,385	61,48	8,46	1,388	60,36	10,04	1,328
6	65,47	4,56	1,483	64,19	5,43	1,438	62,16	7,36	1,430	58,88	8,46	1,449	56,98	6,98	1,407
8	64,56	4,24	1,504	62,77	4,83	1,471	60,59	6,85	1,467	57,15	8,36	1,493	54,73	4,79	1,464
12	62,92	3,34	1,543	61,21	4,08	1,508	58,32	5,57	1,524	54,61	6,65	1,562	52,03	2,13	1,540
16	61,93	2,70	1,568	60,16	4,08	1,535	56,90	4,87	1,562	53,02	5,61	1,609	50,32	0,46	1,593
24	60,91	2,07	1,594	58,76	3,03	1,571	54,80	3,37	1,622	50,42	3,34	1,692	50,00		1,603
32	60,32	1,65	1,609	57,94	2,36	1,594	53,74	2,91	1,654	48,79	1,93	1,749	49,94		1,605
48	59,58	1,13	1,629	57,13	2,01	1,616	52,75	2,33	1,685	47,96	1,23	1,779	49,90		1,606
64	59,23	0,87	1,639	56,08	1,08	1,646	52,03	1,83	1,708	47,41	0,80	1,799	49,86		1,607
96	58,84		1,650	55,73		1,657	51,43		1,728	47,08		1,812			
128	58,67		1,655	55,58		1,661	50,83		1,749	46,86		1,821			
192	58,45		1,661	55,12		1,675	50,42		1,763	46,73		1,826			
256	58,36		1,664	55,00		1,679	50,20		1,771	46,61		1,830			
CÁPSULA N°	01			02			03			04			05		
ALTURA EXPUESTA, mm	10,00			10,00			10,00			10,00			10,00		
VOLUMEN EXPUESTO, cm ³	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63		
MASA SUELO SECO EXPUESTO, gr	32,67			32,97			34,77			35,93			31,55		
MASA SUELO SECO DESPRENDIDO + TARA, gr	146,70			148,20			145,50			141,40			97,40		
TARA, gr	64,90			66,40			69,40			68,10			66,10		
MASA SUELO SECO DESPRENDIDO, gr	81,80			81,80			76,10			73,30			31,30		
PÉRDIDA DE MASA POR INMERSIÓN, %	250,40			248,10			218,80			204,00			99,20		

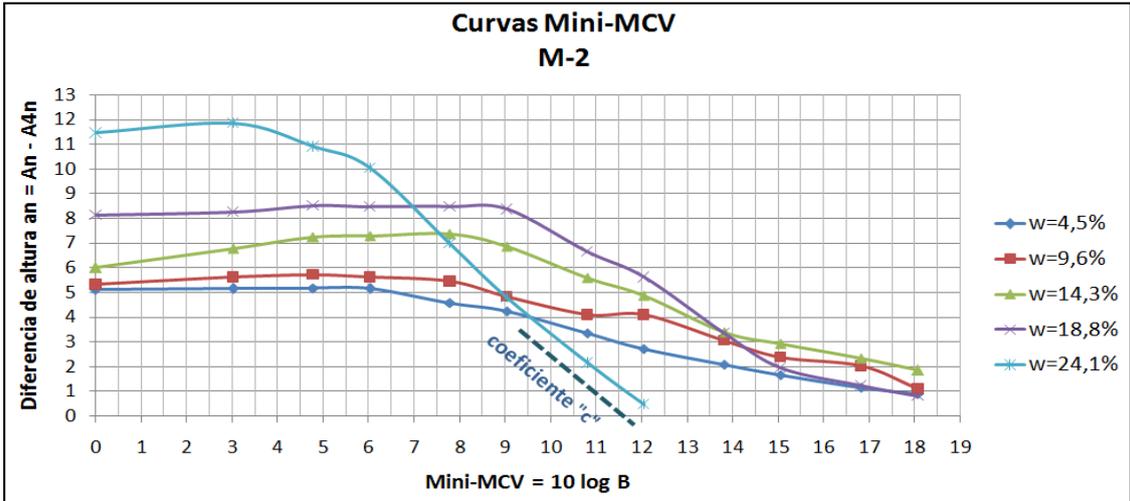


Figura 21.- Curvas de deformabilidad del suelo M-2.

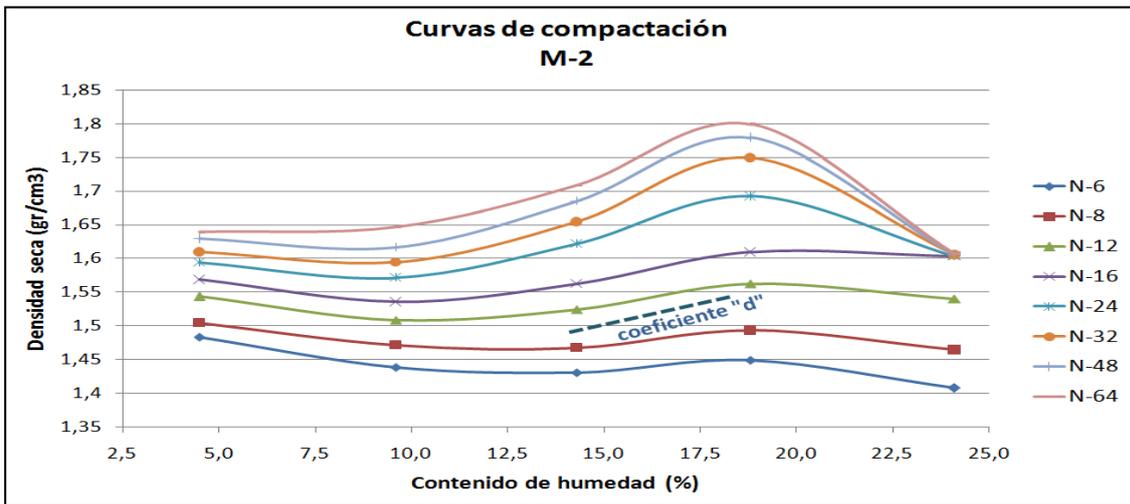


Figura 22.- Curvas de compactación del suelo M-2.

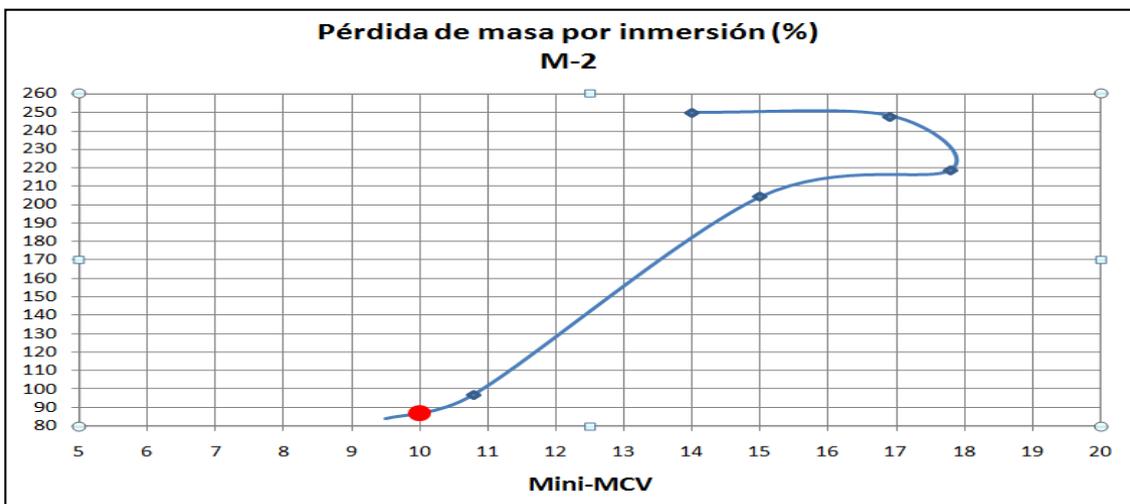


Figura 23.- Curva de pérdida de masa por inmersión del suelo M-2.

4.2.2. Sistema de Clasificación MCT

Los valores obtenidos en los ensayos Mini-MCV y Pérdida de masa por inmersión se resumen en la Tabla N° 6, estos valores y el coeficiente e' generado a partir de los anteriores permiten conocer el tipo de suelo según el sistema de clasificación MCT (Figura N° 24). En consecuencia, el suelo M-1 es considerado un suelo limoso no laterítico (NS'); y el suelo M-2, suelo arcilloso no laterítico (NG').

Tabla 6
Mini MCV, Pérdida de masa por inmersión y Clasificación MCT

Suelo	c'	Pi (%)	d'	e'	Clasificación MCT
M-1	1.45	106	20	1.27	NS'
M-2	1.52	89	15	1.31	NG'

Nota: c' = coeficiente de deformabilidad; Pi=pérdida de masa por inmersión; d' =coeficiente de compactación; e' =coeficiente generado a partir de los coeficientes d' y Pi; NS'= suelo limoso no laterítico; NG'= suelo arcilloso no laterítico

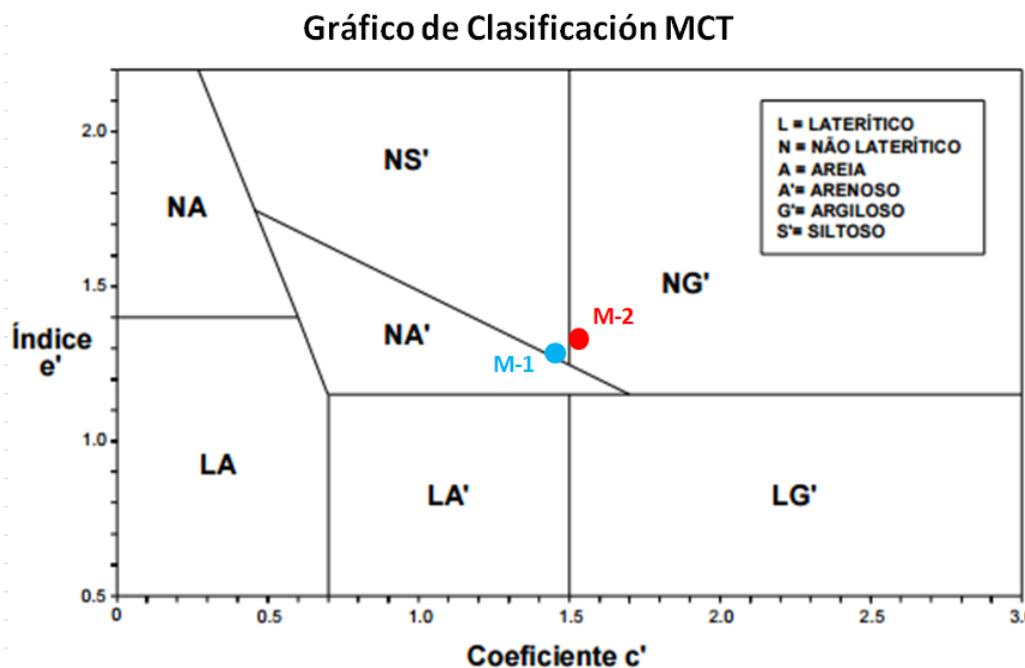


Figura 24.- Clasificación de los suelos M-1 y M-2 en el gráfico MCT.

4.2.3. Ensayos Mini Proctor y Mini CBR

Los ensayos Mini Proctor con energía intermedia y Mini CBR fueron ejecutados para ambos suelos, cuyos resultados se presentan en la Tabla

Nº 7. Respecto al Mini Proctor, los óptimos contenidos de humedad resultantes para el M-1 y M-2 son 14.0% y 17.8%, respectivamente; y las densidades secas correspondientes a estas humedades son 1.875 y 1.723 gr/cm³, respectivamente. Asimismo se tienen valores de Mini CBR en los estados sin inmersión y con inmersión en agua, ambos a 2 mm y 2.5 mm de penetración, de los cuales se consideran los valores mayores. Los CBR sin inmersión para los suelos M-1 y M-2 son 10.6% y 9.7%, respectivamente; y en el estado con inmersión, 4% y 2.5% respectivamente.

Tabla 7
Mini Proctor y Mini CBR

Suelo	Mini Proctor		Mini CBR sin inmersión		Mini CBR con inmersión	
	OCH (%)	MDS (gr/cm ³)	2 mm	2.5 mm	2 mm	2.5 mm
M-1	14.0	1.875	8.3	10.6	3.2	4.0
M-2	17.8	1.723	7.7	9.7	2.0	2.5

Nota: OCH= Óptimo contenido de humedad; MDS= Máxima densidad seca; Mini CBR= Capacidad de soporte

4.2.4. Ensayos hidrogeológicos

Los ensayos hidrogeológicos permitieron determinar los valores de infiltrabilidad, permeabilidad, contracción y expansión de los suelos, los cuales son 0.00744, 0.000071, 1.02 y 2.29 respectivamente para el suelo M-1; y 0.00439, 0.000015, 0.79 y 4.12 respectivamente para el suelo M-2, como se muestra en la Tabla Nº 8.

Tabla 8
Ensayos hidrogeológicos

Suelo	Ensayos hidrogeológicos			
	Infiltrabilidad (cm/ $\sqrt{\text{min}}$)	Permeabilidad (cm/s)	Contracción (%)	Expansión (%)
M-1	0.00744	0.000071	1.02	2.29
M-2	0.00439	0.000015	0.79	4.12

4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTUDIO

4.3.1. Laboratorio

La ejecución de los ensayos en laboratorio emplea menor cantidad de suelo y tiempo de operación con la metodología miniatura, siendo respectivamente el 14% y 94%, correspondiente al empleado con la metodología tradicional, como muestra la Figura 25. A partir de los resultados anteriores, para el estudio de un kilómetro de carretera se estima que la cantidad de suelo y tiempo empleado con la metodología miniatura representa respectivamente el 20% y 92%, correspondiente a la metodología tradicional (Figura 26).

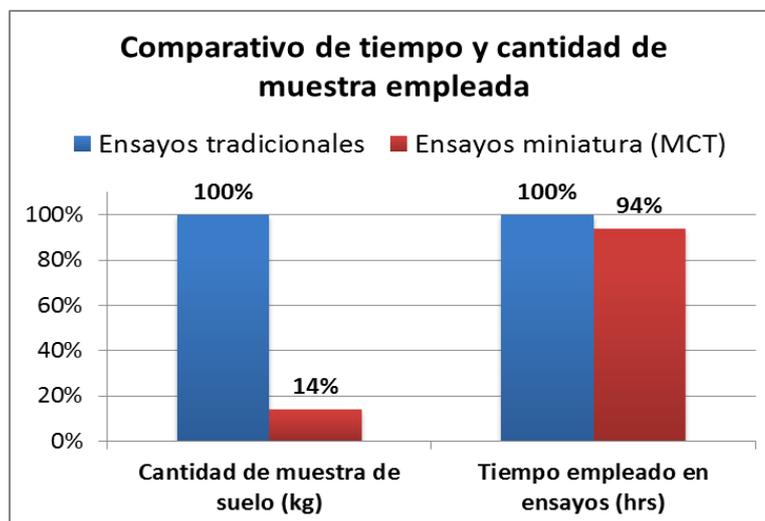


Figura 25.- Comparativo de cantidad de muestra y tiempo empleado.

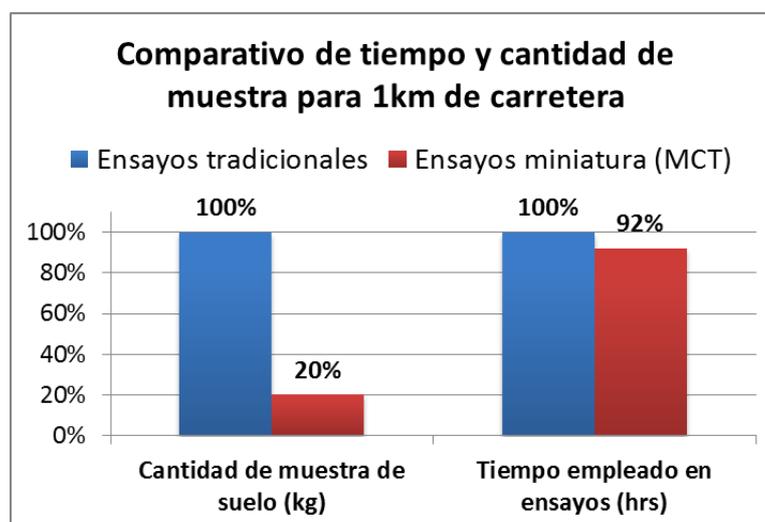


Figura 26.- Comparativo de cantidad de muestra y tiempo empleado, para 1 km de carretera.

4.3.2. Caracterización y clasificación de suelos

Los sistemas tradicionales de clasificación de suelos, los cuales ejercen mayor énfasis en el tamaño de sus componentes, empleados en los suelos tropicales de Madre de Dios presentan, al margen del lenguaje de cada sistema, información distinta al sistema MCT; por un lado con el sistema AASHTO se concluyó que los suelos M-1 y M-2 son suelos arcillosos por pertenecer a los grupos A-6 y A-7-6; y con el sistema SUCS, son considerados suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). Por otro lado, con el sistema de clasificación MCT lo suelos M-1 y M-2 son considerados limosos no lateríticos y arcillosos no lateríticos, respectivamente.

En primer lugar se observa que el sistema MCT considera al suelo M-1 como un suelo limoso, cuya característica no fue nombrada por los sistemas tradicionales.

En segundo lugar, el sistema MCT menciona que los suelos presentan comportamiento no laterítico, lo cual considera como suelos que mantienen las propiedades de su roca matriz, no presentan buen drenaje, son expansivos, de baja capacidad de soporte, y entre otras características propias de suelos saprolíticos.

En la Tabla N° 9 se presenta un resumen los sistemas tradicionales y MCT con la clasificación respectiva de los suelos M-1 y M-2.

Tabla 9
Resumen de clasificaciones de suelos

Suelo	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Clasificación MCT
M-1	A-6 (6)	CL	NS'
M-2	A-7-6 (26)	CL	NG'

4.3.3. Compactación de suelos

Las características de compactación de los suelos obtenidos por ambas metodologías se muestran en la Tabla 10, donde se percibe valores

similares entre los resultados de ambos métodos, principalmente para el suelo M-2.

Los óptimos contenidos de humedad de los suelos M-1 y M-2 se diferencian en 35.9% y 1.1% respectivamente, en base a los resultados obtenidos con el Proctor Modificado, como se muestra en la Figura 27, esto es debido a que el suelo M-1 presenta elementos granulares como la arena fina, que le da mayor variación en el contenido de humedad por el fenómeno de capilaridad durante la compactación.

Por otro lado, las máximas densidades secas de los suelos M-1 y M-2, obtenidas por el ensayo Mini Proctor intermedio, representan el 97.7% y 96.3% de las densidades obtenidas en el ensayo Proctor Modificado, teniendo una diferencia del 2.3% y 3.7% respectivamente. (Figura 28)

Tabla 10
Resumen de características de compactación de suelos

Suelo	Proctor modificado		Mini Proctor intermedio	
	OCH (%)	MDS (gr/cm ³)	OCH (%)	MDS (gr/cm ³)
M-1	10.3	1.919	14.0	1.875
M-2	17.6	1.790	17.8	1.723

Nota: OCH= Óptimo contenido de humedad; MDS= Máxima densidad seca.

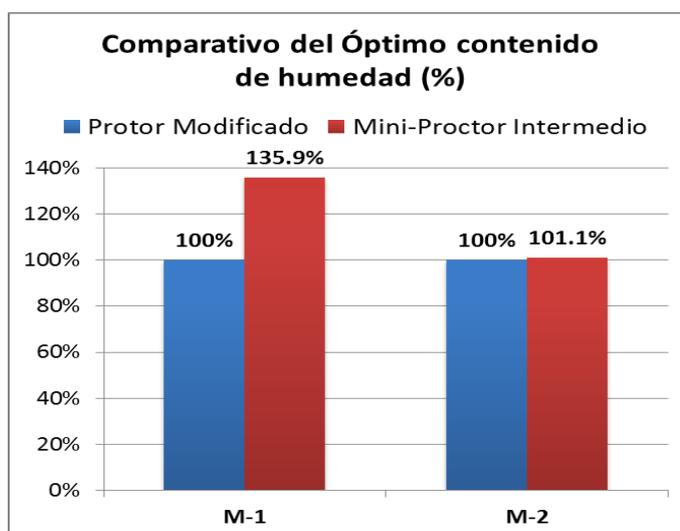


Figura 27.- Comparativo de los OCH obtenidos por ambas metodologías.

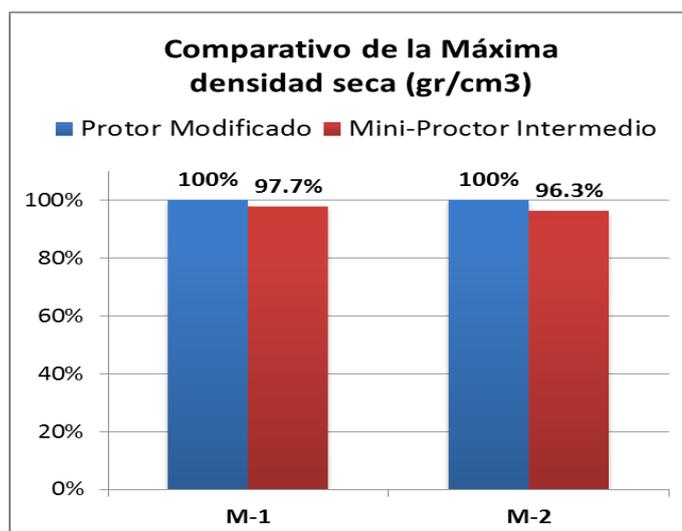


Figura 28.- Comparativo de las MDS obtenidas por ambas metodologías.

4.3.4. Comportamiento mecánico de suelos

Los valores de CBR, generados a partir de los valores Mini CBR, se calcularon con las ecuaciones propuestas por Nogami (1972), las cuales correlacionan el par CBR y Mini CBR.

Para el suelo M-1, del grupo NS', se aplica la Ecuación 17:

$$CBR = 0.481 \times Mini\ CBR + 5.806 = 7.7 \quad (17)$$

Para el suelo M-2, del grupo NG', se aplica la Ecuación 18:

$$CBR = 0.922 \times Mini\ CBR + 1.064 = 3.4 \quad (18)$$

Estos nuevos valores llamados *CBR, los valores de Mini CBR y los valores CBR obtenidos por el ensayo tradicional para los suelos M-1 y M-2 se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11
Valores de CBR, *CBR y Mini CBR

Suelo	CBR (%)	*CBR (%)	Mini CBR (%)
M-1	8.1	7.7	4.0
M-2	4.9	3.4	2.5

En la Figura 29 se observa que los valores de Mini CBR de los suelos M-1 y M-2 representan el 49.4% y 51.0%, respectivamente, de los valores CBR; y los valores de *CBR obtenidos por correlaciones son el 95.1% y 69.4%, respectivamente. Del comparativo se puede deducir que las correlaciones son más precisas para el suelo M-1.

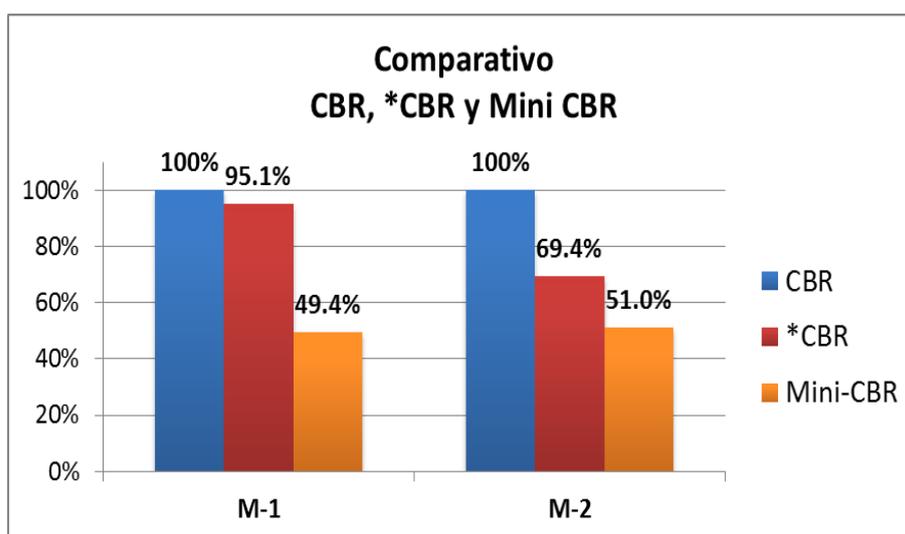


Figura 29.- Comparativo de los valores de CBR, *CBR y Mini CBR, en base al CBR tradicional.

4.3.5. Comportamiento hidrogeológico de suelos

La metodología tradicional peruana de estudio de suelos con fines de pavimentación, carece de ensayos que verifiquen el comportamiento hidrogeológico de los suelos, algunos profesionales adecúan ensayos para conocer ciertos parámetros hidrogeológicos, sin embargo no se encuentran estandarizados y no se pueden aplicar en estructuración de pavimentos bajo la normativa actual.

Los ensayos hidrogeológicos que se pueden realizar con los equipos miniatura son prácticos en su ejecución, permiten conocer el comportamiento hidrogeológico más cercano a la realidad de los suelos tropicales, identificar la susceptibilidad hídrica más crítica de los suelos, y es posible el empleo de sus resultados en métodos de estructuración de pavimentos bajo normativa brasilera.

4.4. ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS – AASHTO 93

Los pavimentos estructurados, de acuerdo al método AASHTO 93, obtenidos a partir de los ensayos CBR y Mini CBR se presentan en la Figura 30.



Figura 30.- Pavimentos estructurados a partir de los ensayos CBR y Mini CBR, con ejes equivalentes asumidos; 100 000 EE, 250 000 EE y 500 000 EE.

Los espesores obtenidos, a partir de los valores de CBR y los *CBR generados, para los suelos M-1 y M-2, bajo 100 000 EE, se diferencian en 2.6% y 6.8%, como muestra la Figura 31; los espesores bajo 250 000 EE, difieren en 2.2% y 7.7% respectivamente (Figura 32); y bajo 500 000 EE, los espesores se diferencian en 1.9% y 8.4%, respectivamente (Figura 33). Bajo estos resultados se puede concluir que es factible el empleo del método AASHTO 93 a partir de los ensayos Mini CBR.

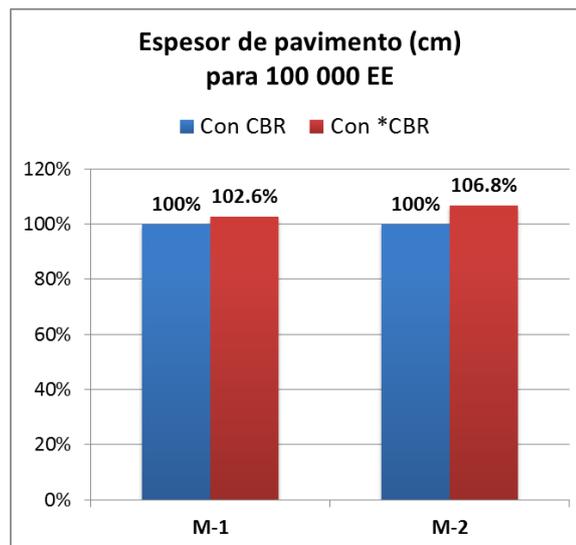


Figura 31.- Comparativo de los espesores para 100 000 EE, en base a los espesores obtenidos a partir del CBR tradicional.

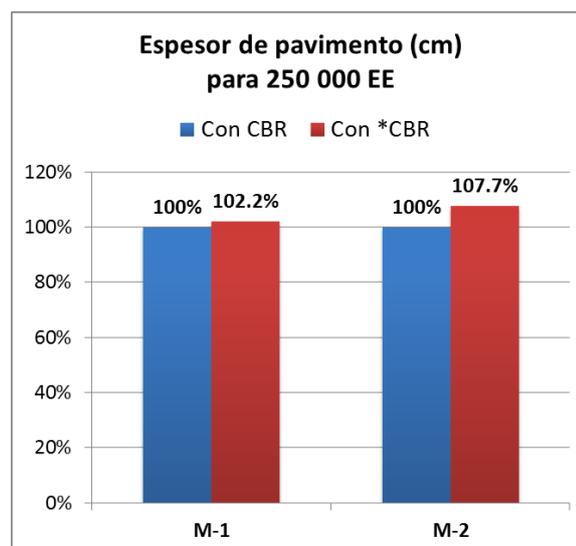


Figura 32.- Comparativo de los espesores para 250 000 EE, en base a los espesores obtenidos a partir del CBR tradicional.

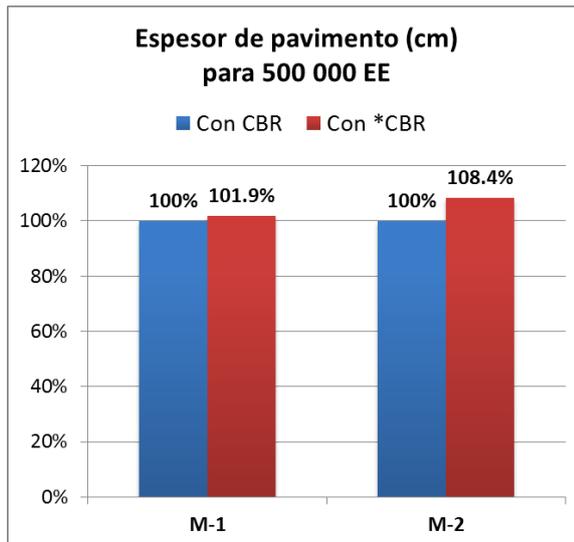


Figura 33.- Comparativo de los espesores para 500 000 EE, en base a los espesores obtenidos a partir del CBR tradicional.

4.5. METODOLOGÍA ESTUDIO Y ESTRUCTURACIÓN DE PAVIMENTOS CON SUELOS TROPICALES

Se propone la metodología MCT para estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación, por los criterios específicos que engloba para conocer sus propiedades geotécnicas, por la facilidad de precisión en la operación de los equipos y por la inclusión de sus resultados en la estructuración de pavimentos bajo el método SAFL, el cual exige parámetros de los suelos que son posibles obtener con la metodología MCT.

Los parámetros del suelo que exige el método SAFL para su uso en la conformación de la base y sub base del pavimento son:

- Mini CBR sin inmersión \geq al 40%,
- Pérdida de soporte por inmersión inferior a 50%, quiere decir $RIS \geq 50\%$ en la Ecuación 19:

$$RIS = \left[\frac{\text{Mini CBR (2 días inmersión)}}{\text{Mini CBR (sin inmersión)}} \right] \times 100 \geq 50\% \quad (19)$$

- Expansión con sobrecarga $\leq 0.3\%$,

- Contracción, K_c , entre 0.1% y 0.5%, bajo las características óptimas de compactación.
- Coeficiente de infiltrabilidad entre $10^{-2} \text{ cm/min}^{1/2}$ y $10^{-4} \text{ cm/min}^{1/2}$.
- El material del suelo debe pasar integralmente por el tamiz de 2 mm de abertura o puede quedar una pequeña porción retenida sin que altere las propiedades del suelo.
- El suelo debe pertenecer a los grupos LA, LA' y LG' de la clasificación MCT.

Los suelos en estudio no cumplen con todos los parámetros exigidos por el método SAFL, sin embargo la combinación con otros materiales que se tiene que realizar para encajar en los parámetros no es tan desventajoso como lo es con los métodos tradicionales, en los que exigen que las bases y las sub bases presenten materiales que se encuentran en otras regiones del país. Los parámetros de suelos que exige el método SAFL es posible conseguirlo con materiales propios de las regiones tropicales, lo cual lo convierte en una alternativa eficiente para estructuración de pavimentos en la selva baja del Perú.

CONCLUSIONES

- Los ensayos miniatura, a diferencia de los ensayos tradicionales, presentan ventajas técnicas debido al empleo de criterios específicos para conocer las características intrínsecas y comportamiento geotécnico de los suelos tropicales. A la vez, su ejecución es más precisa por el diseño adecuado de los equipos y el empleo de menor energía del operador.
- La cantidad de suelo y el tiempo de ejecución empleado en los ensayos miniatura son respectivamente el 14% y 94%, correspondiente a lo empleado en los ensayos tradicionales, lo cual indica la reducción en los costos de ensayos y transporte de muestras de suelo desde el punto de extracción hasta el laboratorio.
- Los resultados de los ensayos miniatura son una alternativa en la estructuración de pavimentos mediante el método AASHTO 93, debido a que los espesores de pavimentos obtenidos difieren hasta 8.4% con los obtenidos a partir de los ensayos tradicionales.
- Se propone la metodología MCT para estudio de suelos tropicales debido a que involucra ensayos de caracterización, compactación y evaluación del comportamiento mecánico e hidrogeológico de los suelos, útiles para determinar los parámetros de suelos que exige el método SAFL, de origen brasilero, para el aprovechamiento del material propio de las zonas tropicales en estructuración de pavimentos.
- El empleo de la metodología MCT, a diferencia de la metodología tradicional, genera ventajas técnicas, económicas y ecológicas en el estudio de suelos tropicales para la conformación de pavimentos con materiales propios de la selva. Por lo tanto, la incidencia de la metodología MCT en el estudio de suelos tropicales con fines de pavimentación es significativamente positiva.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar un estudio integral para 1 km de carretera con la metodología MCT, para verificar las diferencias en cantidad de muestra y tiempo de ejecución de ensayos en base a lo empleado con la metodología tradicional.
- Se sugiere realizar ensayos miniatura con diferentes tipos de suelos tropicales y repetidas veces para verificar la precisión de los resultados e identificar alguna deficiencia en el diseño de los equipos.
- Se recomienda variar los parámetros de tráfico y emplear otros suelos tropicales con diferentes valores de CBR y Mini CBR en la estructuración de pavimentos con el método AASHTO 93, para verificar si los espesores de pavimentos obtenidos mantienen una diferencia despreciable.
- Se recomienda emplear suelos tropicales que se ajusten a los parámetros exigidos por el método SAFL, o crearlos a partir de combinación de materiales, para conocer las ventajas y desventajas de los pavimentos que se obtienen con este método.
- Se sugiere realizar trabajos de investigación relacionado a mejoramiento de suelos por estabilización o reforzamiento para verificar la incidencia de la metodología MCT en dichos fines.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, R. (2007). *Estudio comparativo de los ensayos de CBR y Mini-CBR para suelos de Uberlandia-MG*. Uberlandia, Brasil: Universidad Federal de Uberlandia.
- Anversa, J. (2015). *Aplicación de la metodología MCT para clasificación de algunos suelos y rocas de la región de Santa María*. Santa María, Brasil: Universidad Federal de Santa María.
- Carrillo, A. (2016). Comportamiento del suelo tropical peruano. *Perfiles de Ingeniería / ISSN 1996-6660*, 27-35.
- Carrillo, A., Carrillo, E., & Cardenas, J. (-). *Propiedades de los suelos tropicales del Perú*. Lima, Perú: Geotecnia de los Suelos Peruanos.
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (2001). Interpretación de forma de las curvas de deformabilidad de la metodología MCT. *33° Reunión Anual de Pavimentación Florianópolis/SC*, 791-803.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem:

- DNER-ME228: Suelos - Compactación en equipo miniatura, 1994
- DNER-ME254: Suelos – Compactación en equipo miniatura – Mini CBR y Expansión, 1997
- DNER-ME 256: Suelos compactados con equipo miniatura – determinación de pérdida de masa por inmersión, 1994.
- DNER-ME 258: Suelos compactados en equipo miniatura – Mini MCV, 1994.
- DNER-CLA 259: Clasificación de suelos tropicales para finalidades rodoviarias utilizando cuerpos de prueba compactados en equipo miniatura, 1995.
- ET-DE-P00/015: Sub base o base de suelo arenoso fino de comportamiento laterítico – SAFL.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones:

- Sección de Suelos y Pavimentos (2014).
- Manual de Ensayo de materiales.

ANEXOS

a) PANEL FOTOGRÁFICO

a.1) Ejecución de ensayos tradicionales



Foto N° 01
Ensayo granulométrico por tamizado del suelo M-1.



Foto N° 02
Caracterización del suelo M-2 por el ensayo de granulometría.



Foto N° 03
Extracción de vacíos del suelo M-1 para determinar su peso específico.



Foto N° 04
Peso del suelo M-2 con fines de calcular su peso específico.



Foto N° 05
Rolos del suelo M-1 para determinar su límite plástico.



Foto N° 06 C-3 km 00+480
Ensayo para determinar el límite plástico del suelo M-2.

a) PANEL FOTOGRÁFICO

a.1) Ejecución de ensayos tradicionales



Foto N° 07
Ensayo para determinar el límite líquido del suelo M-1.



Foto N° 08
Equipo del ensayo para determinar el límite líquido del suelo M-2.



Foto N° 09
Compactación del suelo M-1 mediante el ensayo Proctor Modificado.

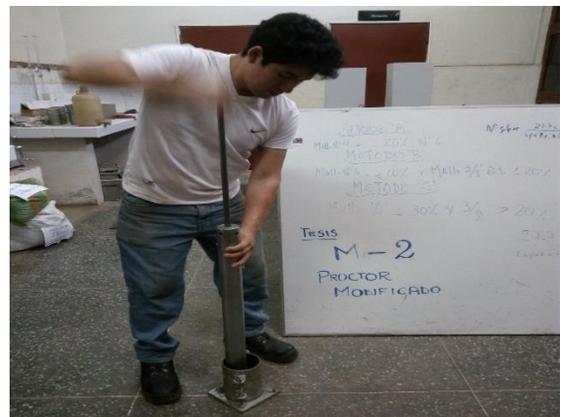


Foto N° 10
Ejecución del ensayo Proctor Modificado para el suelo M-2.



Foto N° 11
Lectura del dial para determinar la expansión del suelo M-2.



Foto N° 12
Penetración al suelo M-1 durante el ensayo para determinar su CBR.

a) PANEL FOTOGRÁFICO

a.2) Ejecución de ensayos miniatura



Foto N° 13
Suelo M-1 tamizado por la malla N°10 para los ensayos miniatura.



Foto N° 14
Suelo M-2 tamizado por la malla N°10 para los ensayos miniatura.



Foto N° 15
Compactación del suelo M-1 durante el ensayo Mini-MCV para su caracterización.



Foto N° 16
Lectura de la altura del espécimen del suelo M-1 compactado en el ensayo Mini-MCV.



Foto N° 17
Extracción de 10mm del espécimen después de la compactación durante el ensayo Mini-MCV.



Foto N° 18
Especimen sumergido para determinar la pérdida de masa por inmersión en agua.

a) PANEL FOTOGRÁFICO

a.2) Ejecución de ensayos miniatura



Foto N° 19
Obtención de las masas perdidas por inmersión de los cinco especímenes del suelo M-1



Foto N° 20
Masas secas correspondientes a lo perdido durante la inmersión de los especímenes.



Foto N° 21
Ensayo para determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo M-1.



Foto N° 22
Compactación del suelo M-2 durante el ensayo Mini Proctor con energía intermedia.



Foto N° 23
Ensayo para determinar el coeficiente de infiltrabilidad del suelo M-1.



Foto N° 24
Suelo M-2 compactado por el ensayo Mini Proctor con energía intermedia.

a) PANEL FOTOGRÁFICO

a.2) Ejecución de ensayos miniatura



Foto N° 25
Suelo M-2 compactado para la ejecución del ensayo de permeabilidad.



Foto N° 26
Suelo M-2 al finalizar el ensayo de infiltrabilidad.



Foto N° 27
Lectura de las alturas iniciales de los suelos M-1 y M-2 para determinar sus expansiones.



Foto N° 28
Lectura de la altura final del espécimen del suelo M-2 para determinar su contracción.



Foto N° 29
Especímenes al finalizar la penetración en la prensa correspondiente al ensayo Mini CBR.



Foto N° 30
Especímen deformado durante el ensayo Mini CBR con inmersión.

a) PANEL FOTOGRÁFICO

a.2) Ejecución de ensayos miniatura



Foto N° 31
Ensayo Mini CBR del suelo M-2.



Foto N° 32
Ensayo Mini CBR del suelo M-1.



Foto N° 33
Especimen ensayado para determinar su Mini CBR con inmersión.



Foto N° 34
Laboratorio de la Dirección de Estudios Especiales del MTC.