

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO DE ACUERDO CON EL MÓDULO RESILIENTE Y EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

HEBER ESAÚ DE LEON LOPEZ

ASESORADO POR: ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Inga. Alba Maritza Guerrero de López |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. Luis Pedro Ortiz de León |
| VOCAL V | P.A. José Alfredo Ortiz Herincx |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|----------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Gabriel Ordóñez Morales |
| EXAMINADOR | Ing. Guillermo Melini Salguero |
| EXAMINADOR | Ing. Dilma Mejicanos Jol |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO DE ACUERDO CON EL MÓDULO RESILIENTE Y EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 30 de septiembre de 2009

HEBER ESAÚ DE LEÓN LÓPEZ



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21088

Guatemala, noviembre de 2010.

Ingeniero
Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, Usac
Guatemala

Ing. Ordoñez

De la manera más atenta me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **"GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO DE ACUERDO CON EL MÓDULO RESILIENTE Y EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE"**, realizado por el estudiante Heber Esaú De León López. Considero que dicho trabajo ha sido finalizado de forma satisfactoria.

Sin otro en particular me suscribo de usted.

Atentamente,

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado 6842

Jefe de Sección Mecánica de Suelos, CII
Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
29 de noviembre de 2010

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

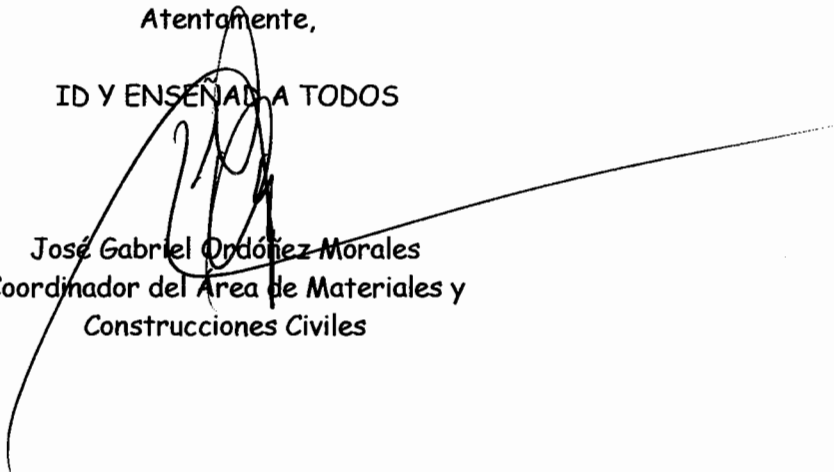
Estimado Ing. Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO DE ACUERDO CON EL MÓDULO RESILIENTE Y EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Heber Esaú de León López, quien contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante De León López, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑANZA A TODOS


José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. José Gabriel Ordóñez Morales al trabajo de graduación del estudiante Heber Esaú de León López, titulado GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO DE ACUERDO CON EL MÓDULO RESILIENTE Y EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero de 2011

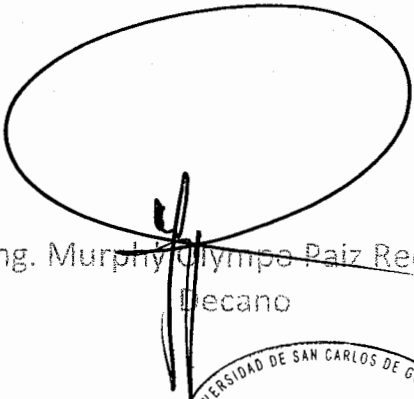
/bbdeb.



DTG. 001.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO DE ACUERDO CON EL MÓDULO RESILIENTE Y EL MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE**, presentado por el estudiante universitario **Heber Esaú De León López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 13 de enero de 2011



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la vida, salud, sabiduría y entendimiento que solo él puede dar e iluminar cada uno de mis pasos.
- Mis padres** Por darme su apoyo moral e incondicional en todos los momentos de mi vida.
- Mis hermanos** Por su apoyo y estar conmigo siempre en todo momento.
- Mis amigos** Por su amistad incondicional, sus consejos y apoyo en todo momento.
- El Ing. Omar E. Medrano Méndez** Por el asesoramiento en el trabajo de Graduación, sus consejos y su amistad incondicional.
- El Ing. Elios Rodríguez** Por su amistad, sus consejos y apoyo en todo momento.
- Sección de Mecánica de Suelos** A todos gracias por su amistad y apoyo.
- Facultad de Ingeniería** Por ser fuente de conocimiento y enseñarme la bases de mi carrera profesional.

DEDICATORIA A:

Dios

Por ser mi fuente de luz que ha iluminado mis pensamientos en todo momento y lugar y por darme la fuerza necesaria para luchar todos los días.

Mis padres

Juan De Dios De León Hernández, por su amor y comprensión en todo momento y apoyo moral en todas y cada una de mis decisiones.

Noemí López Ramos, por su amor, cariño y apoyo incondicional y ser ejemplo de superación personal.

Mis hermanos

Yanina Grisela De León López y Aldo Samuel De León López, por todo el apoyo recibido siempre.

Mis sobrinos

Cleydi Paola Salazar De León y José Abraham Salazar De León, por su amor y cariño que me da fuerza para seguir adelante.

Mis tíos

Por ayudarme siempre y brindarme de sus consejos en todo momento para ser mejor persona.

Mis primos

Por estar siempre presentes ayudándome en los momentos que necesite de ellos.

Mis amigos

Por estar siempre presentes en todo momento para ayudarme y brindarme su amistad incondicional, Dios los bendiga a todos siempre.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|--------------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| LISTA DE SIMBOLOS | XIII |
| GLOSARIO | XV |
| RESUMEN | XIX |
| OBJETIVOS | XXI |
| INTRODUCCIÓN | XXIII |
| | |
| 1. CONCEPTOS BÁSICOS | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Suelos cohesivos | 4 |
| 1.2.1 Limos | 5 |
| 1.2.2 Arcillas | 5 |
| 1.3 Suelos granulares | 6 |
| 1.3.1 Gravas | 7 |
| 1.3.2 Arenas | 7 |
| 1.4 Clasificación de suelos | 8 |
| 1.4.1 Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO | 8 |
| 1.4.2 Sistema de clasificación unificado de suelos | 12 |
| 1.5 Propiedades físicas de los granulares y cohesivos | 17 |
| 1.5.1 Textura | 18 |
| 1.5.2 Estructura | 19 |
| 1.5.2.1 Grados de estructura del suelo | 19 |
| 1.5.2.2 Clases de estructura del suelo | 20 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.5.2.3 | Tipos de estructura del suelo | 21 |
| 1.5.3 | Porosidad | 21 |
| 1.5.4 | Permeabilidad | 23 |
| 1.5.5 | Color | 24 |
| 1.5.6 | Consistencia | 24 |
| 1.5.6.1 | Cohesión | 25 |
| 1.5.6.2 | Adhesión | 25 |
| 1.6 | Propiedades mecánicas de los suelos granulares y cohesivos | 26 |
| 1.6.1 | Capacidad de carga admisible | 26 |
| 1.6.2 | Resistencia al corte | 27 |
| 1.6.3 | Resistencia al desgaste mecánico | 29 |
| 1.7 | Propiedades mecánicas de una carpeta de rodadura tipo flexible (de cemento asfáltico) | 29 |
| 1.7.1 | Módulo resiliente | 31 |
| 1.7.2 | Resistencia a la tracción indirecta | 32 |
| 1.7.3 | Deformaciones plásticas | 32 |
| 1.7.4 | Estabilidad | 32 |
| 1.8 | Propiedades mecánicas de una carpeta de rodadura tipo rígida (de concreto hidráulico tipo portland) | 33 |
| 1.8.1 | Módulo de ruptura (MR) | 34 |
| 1.8.2 | Módulo de elasticidad | 35 |

2. PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO 37

| | | |
|---------|---------------------------------|----|
| 2.1 | Consideraciones de diseño | 37 |
| 2.1.1 | Desempeño del tipo de pavimento | 38 |
| 2.1.1.1 | Capa de subrasante | 39 |
| 2.1.1.2 | Capa de sub-base | 40 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.1.1.3 | Capa de base | 41 |
| 2.1.2 | Tráfico | 42 |
| 2.1.2.1 | Carga equivalente de ejes simples | 42 |
| 2.1.2.2 | Factor de distribución por dirección | 52 |
| 2.1.2.3 | Factor de distribución por carril | 52 |
| 2.1.3 | Suelos de subrasante | 53 |
| 2.1.3.1 | Módulo de reacción (K) | 54 |
| 2.1.3.2 | Módulo de resiliencia (Mr) | 55 |
| 2.1.4 | Materiales de construcción | 57 |
| 2.1.4.1 | Materiales para subrasante | 58 |
| 2.1.4.2 | Materiales para base y sub-base | 59 |
| 2.1.4.3 | Materiales para concreto asfáltico | 63 |
| 2.1.4.4 | Materiales para concreto hidráulico | 64 |
| 2.1.5 | Medio ambiente | 67 |
| 2.1.5.1 | Coefficiente de drenaje | 70 |
| 2.1.6 | Confiabledad | 76 |
| 2.1.7 | Serviciabilidad | 80 |
| 2.1.8 | Transferencia de carga | 83 |
| 2.2 | Ecuación para el diseño de la estructura de pavimento flexible | 87 |
| 2.3 | Número estructural SN de la estructura de pavimento flexible | 89 |
| 2.4 | Ecuación para el diseño de la estructura de pavimento rígido | 90 |
| 3. | METODOLOGÍA DE ENSAYOS | 93 |
| 3.1 | Recolección de muestras en campo | 93 |
| 3.1.1 | Tipo de muestra a considerar para el diseño de la estructura de pavimento | 93 |
| 3.1.2 | Determinación del lugar de la extracción | 94 |
| 3.1.3 | Procedimiento de extracción | 95 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.1.4 | Forma de transporte | 97 |
| 3.2 | Equipo utilizado en laboratorio | 98 |
| 3.2.1 | Moldes y martillo para el ensayo de proctor | 99 |
| 3.2.2 | Moldes y martillo para el ensayo de C.B.R. | 99 |
| 3.2.3 | Horno para determinación de humedades | 100 |
| 3.2.4 | Máquina para determinar el valor de Relación Soporte California | 101 |
| 3.2.5 | Máquina de compresión triaxial | 101 |
| 3.2.6 | Tallador de muestras | 103 |
| 3.2.7 | Enseres complementarios | 103 |
| 3.3 | Procedimiento de laboratorio | 105 |
| 3.3.1 | Manipulación de la muestra | 105 |
| 3.3.2 | Ensayo de análisis granulométrico | 106 |
| 3.3.3 | Ensayo de límites de Atterberg | 107 |
| 3.3.3.1 | Límite líquido (LL) | 108 |
| 3.3.3.2 | Límite plástico (LP) | 108 |
| 3.3.3.3 | Índice plástico (IP) | 109 |
| 3.3.4 | Ensayo de proctor | 110 |
| 3.3.5 | Ensayo de C.B.R. | 111 |
| 3.3.6 | Ensayo de compresión triaxial | 113 |
| 4. | DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO | 115 |
| 4.1 | Determinación de la densidad máxima y el valor de Relación Soporte California | 115 |
| 4.2 | Determinación del esfuerzo desviador y deformación unitaria en el ensayo de compresión triaxial | 118 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3 | Determinación del módulo de resiliencia de la subrasante mediante el valor de C.B.R. | 120 |
| 4.4 | Determinación del módulo de reacción de la subrasante mediante el valor de C.B.R. | 121 |
| 4.5 | Determinación de los factores del número estructural y espesores de las capas en pavimento flexible | 123 |
| 4.5.1 | Número estructural de la carpeta asfáltica | 124 |
| 4.5.2 | Número estructural de la capa de base | 126 |
| 4.5.3 | Número estructural de la capa de sub-base | 129 |
| 4.5.4 | Determinación de los espesores de cada capa | 130 |
| 5. | CÁLCULO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LABORATORIO | 135 |
| 5.1 | Procedimiento y secuencia de los cálculos en laboratorio | 135 |
| 5.2 | Ejemplo para diseño de estructura de pavimento flexible | 144 |
| 5.2.1 | Determinación de los parámetros para la solución de pavimento flexible | 144 |
| 5.2.2 | Solución de la ecuación para pavimento flexible | 147 |
| 5.3 | Ejemplo para diseño de estructura de pavimento rígido | 150 |
| 5.3.1 | Determinación de los parámetros para la solución de pavimento rígido | 150 |
| 5.3.2 | Solución de la ecuación para pavimento rígido | 154 |
| | CONCLUSIONES | 157 |
| | RECOMENDACIONES | 159 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 161 |
| | APÉNDICE | 163 |
| | ANEXOS | 183 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Clasificación de suelos método AASHTO | 11 |
| 2 | Carta de plasticidad | 12 |
| 3 | Sistema unificado de clasificación de suelos | 16 |
| 4 | Triángulo de textura de suelos | 18 |
| 5 | Reacción de la subrasante | 30 |
| 6 | Carga en pavimento rígido | 33 |
| 7 | Ensayo de flexión de una viga de concreto hidráulico | 34 |
| 8 | Comportamiento en las estructuras de los pavimentos | 38 |
| 9 | Cálculo de los factores equivalentes de carga por vehículo | 49 |
| 10 | Hoja de trabajo para calcular el ESAL's de diseño | 50 |
| 11 | Relación de K con el C.B.R. | 54 |
| 12 | Relación del Mr. con el C.B.R. | 56 |
| 13 | Sumatoria de días con lluvia promedio anual | 68 |
| 14 | Temperaturas máximas al año | 69 |
| 15 | Geometría de base o sub-base | 72 |
| 16 | Factor de tiempo para un drenaje de 50% | 75 |
| 17 | Gráfica del comportamiento de la confiabilidad R | 78 |
| 18 | Pérdida de serviciabilidad | 81 |
| 19 | Efectividad de juntas de transferencia de carga | 84 |
| 20 | Carril ancho ≥ 4 m | 84 |
| 21 | Confinamiento con guarniciones o banquetas | 85 |
| 22 | Losa con acotamientos laterales | 85 |

| | | |
|----|--|-----|
| 23 | Características de las barras pasajuntas | 86 |
| 24 | Fórmula de diseño para pavimento flexible | 87 |
| 25 | Fórmula de diseño para pavimento rígido | 91 |
| 26 | Suelo para subrasante | 94 |
| 27 | Extracción de muestra alterada | 97 |
| 28 | Traslado de muestras | 98 |
| 29 | Molde y martillo para proctor | 99 |
| 30 | Molde y martillos para C.B.R. | 100 |
| 31 | Horno eléctrico para humedades | 100 |
| 32 | Prensa digital para C.B.R. | 101 |
| 33 | Máquina de compresión triaxial | 102 |
| 34 | Tallador para muestras de 2.5" de diámetro | 103 |
| 35 | Enseres complementarios | 104 |
| 36 | Estados y límites de los suelos | 107 |
| 37 | Ensayos de límites de Atterberg | 110 |
| 38 | Procesos de compactación y saturación de las pastillas de C.B.R. | 112 |
| 39 | Proceso de aplicación de carga a las pastillas de C.B.R. | 113 |
| 40 | Gráfica PUS vs. Porcentaje de Humedad | 115 |
| 41 | Deformación del anillo de carga vs. Penetración (0.001") | 116 |
| 42 | Porcentaje de C.B.R. vs. Porcentaje de compactación | 117 |
| 43 | Esfuerzo desviador (kPa) vs. Deformación unitaria | 119 |
| 44 | Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto K_c | 122 |
| 45 | Coefficiente estructural a_1 vs. Módulo elástico del asfalto | 124 |
| 46 | Nomograma para determinar el coeficiente estructural a_1 | 125 |
| 47 | Nomograma 1 para determinar el coeficiente estructural a_2 | 126 |
| 48 | Nomograma 2 para determinar el coeficiente estructural a_2 | 127 |
| 49 | Nomograma 3 para determinar el coeficiente estructural a_2 | 128 |
| 50 | Nomograma para determinar el coeficiente estructural a_3 | 129 |
| 51 | Secuencia de espesores requeridos | 131 |

| | | |
|----|--|-----|
| 52 | Resolviendo ecuación para SN_1 | 132 |
| 53 | Resolviendo ecuación para SN_2 | 132 |
| 54 | Resolviendo ecuación para SN_3 | 133 |
| 55 | Resolviendo ecuación en el ejemplo para SN | 147 |
| 56 | Resolviendo ecuación en el ejemplo para SN_1 | 147 |
| 57 | Resolviendo ecuación en el ejemplo para SN_2 | 148 |
| 58 | Esquema de la estructura final de pavimento flexible | 150 |
| 59 | Resolviendo la ecuación para K_c | 154 |
| 60 | Esquema de la estructura final de pavimento rígido | 155 |

TABLAS

| | | |
|-------------|---|----|
| I | Longitud de carretera en Centro América para 1970 | 2 |
| II | Textura contra permeabilidad | 23 |
| III | Capacidad de carga admisible de los suelos | 27 |
| IV | Valores de módulo de ruptura (MR) recomendados | 35 |
| V | Peso límite de vehículos en Centroamérica | 44 |
| VI | Pesos por eje para vehículos tipo C2 y C3 | 45 |
| VII | Pesos totales autorizados para todas las combinaciones | 45 |
| VIII | Factor de crecimiento de tráfico | 48 |
| IX | Factores de distribución por dirección | 52 |
| X | Factores de distribución por carril | 53 |
| XI | Especificaciones para sub-base de acuerdo con el libro azul de caminos 2001 | 59 |
| XII | Especificaciones para base de acuerdo con el libro azul de caminos 2001 | 60 |
| XIII | Tipos de graduación para materiales de sub-base o base granular | 62 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| XIV | Tipos de graduación para materiales de sub-base o base triturada | 62 |
| XV | Especificaciones para materiales de mezclas asfáltica de acuerdo con el libro azul de caminos 2001 | 63 |
| XVI | Graduación de materiales para pavimento de concreto asfáltico | 64 |
| XVII | Requisitos de graduación para el polvo mineral | 64 |
| XVIII | Especificaciones para materiales en mezclas de concreto hidráulico de acuerdo con el libro azul de caminos 2001 | 65 |
| XIX | Graduación para agregado grueso de concreto hidráulico | 66 |
| XX | Graduación para agregado fino de concreto hidráulico | 66 |
| XXI | Grados de asfalto de acuerdo con el tipo de clima | 70 |
| XXII | Coefficientes de drenaje para pavimento flexible (m_i) | 71 |
| XXIII | Coefficientes de drenaje para pavimento rígido (C_d) | 71 |
| XXIV | Cantidad de agua que puede drenar por gravedad | 74 |
| XXV | Tiempos de drenaje para capas granulares | 76 |
| XXVI | Valores 1 de confiabilidad R | 77 |
| XXVII | Valores 2 de confiabilidad R | 77 |
| XXVIII | Factores de seguridad FS | 77 |
| XXIX | Confiabilidad R según el tránsito en el carril de diseño | 79 |
| XXX | Valores de Z_r en función de la confiabilidad R | 79 |
| XXXI | Valores de serviciabilidad | 81 |
| XXXII | Valores de coeficientes de transferencia de carga J | 86 |
| XXXIII | Períodos de diseño | 89 |
| XXXIV | Espesores mínimos sugeridos | 90 |
| XXXV | Esfuerzo desviador y deformación unitaria | 118 |
| XXXVI | Resumen de resultados de pruebas de laboratorio | 135 |
| XXXVII | Tráfico promedio diario anual y tasa de crecimiento vehicular | 137 |
| XXXVIII | Tipos de vehículos utilizados para el TPDA | 137 |
| XXXIX | Ejemplo de granulometría para base granular tipo B-1 | 140 |
| XL | Ejemplo de granulometría para sub-base granular tipo B-1 | 142 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| XLI | Factor de camión 1 | 145 |
| XLII | Hoja de trabajo para calcular el ESAL's en el carril de diseño 1 | 145 |
| XLIII | Factor de camión 2 | 151 |
| XLIV | Hoja de trabajo para calcular el ESAL's en el carril de diseño 2 | 152 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|---|
| AC | “Asphalt Cement”, (Cemento Asfáltico). Un material procedente de residuos del petróleo. |
| Cc | Coefficiente de uniformidad de un suelo. |
| C_d | Coefficiente de drenaje para pavimento rígido. |
| Cu | Coefficiente de curvatura de un suelo. |
| Ec | Módulo de elasticidad del concreto hidráulico. |
| IP | Índice de plasticidad de un suelo. |
| J | Factor de transferencia de carga en pavimento rígido. |
| K | Módulo de reacción de la subrasante. |
| Kc | Módulo de reacción compuesto de la subrasante. |
| LL | Límite líquido de un suelo. |
| LP | Límite plástico de un suelo. |
| MR | Módulo de ruptura de concreto hidráulico. |

| | |
|----------------------|---|
| Mr | Módulo de resiliencia de la subrasante. |
| m_i | Coefficiente de drenaje para pavimento flexible. |
| SN | Número estructural determinado para pavimento flexible. |
| TPDA | Tráfico promedio diario anual. |
| σ_d | Esfuerzo desviador. |
| ε_r | Deformación unitaria remanente. |
| ΔPSI | Perdida de serviciabilidad. |

GLOSARIO

| | |
|--------------------------|---|
| AASHTO | Siglas en inglés que corresponden a la entidad Americana "AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIAL", (Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales de Transporte). |
| Agregado | Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria y la roca triturada, usada para ser mezclado en diferentes tamaños. |
| Asfalto | Un material cementante, entre carmelito oscuro y negro, en la cual los constituyentes predominantes son bitúmenes que aparecen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. |
| ASTM | Siglas en inglés que corresponden a la entidad Americana "AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS". (SOCIEDAD AMERICANA PARA PRUEBAS Y MATERIALES). |
| Banco de material | Depósitos naturales que es una mezcla de material fino, material intermedio y material grueso. |

| | |
|------------------------------|--|
| Bitumen | Un tipo de sustancia cementante de color negro oscuro (solida, semisólida, o viscosa), compuesta generalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas y betunes. |
| C.B.R. | “California Bearing Ratio”, (Relación Soporte California). Ensayo para suelos que determina la resistencia al corte y a la penetración. |
| Concreto asfáltico | Una mezcla en caliente, muy bien controlada de cemento asfáltico de alta calidad y agregado grueso intermedio y fino bien graduado (de alta calidad) compactada. |
| Concreto hidráulico | Una mezcla de cemento tipo portland y una combinación de agregado bien grueso medio y fino bien graduado (también de alta calidad). |
| Deformación remanente | Se refiere a la deformación unitaria de un suelos bajo cargas repetidas que no se recupera después de haber retirado la carga. |
| Denudación | Se refiere a la desintegración de rocas en granos finos. |
| ESAL's | “Equivalent Single Axle Loads”, (Carga equivalente de ejes simples). Se refiere a la conversión de ejes normales de vehículos en número equivalente de ejes de 18 000 libras. |

| | |
|--------------------|--|
| LEF's | “Load Equivalente Factors”, (Factores equivalente de carga). Se refiere a la equivalencia del daño de cualquier tipo de eje a un eje de sencillo de 18 000 libras. |
| Nomograma | Constituye una herramienta gráfica de cálculo bidimensional el aproximado de una función. |
| Resiliencia | Propiedad de los suelos para recuperar cierta deformación después de haber sido sometido a cargas compresivas. |

RESUMEN

La determinación de una estructura de pavimento confiable y duradero se basa en el desempeño de las distintas capas que la van a conformar, tal y como son las capas de subrasante, sub-base, base y carpeta de rodadura; pero para todo ello es muy importante tener en cuenta otros factores como: lo son el coeficiente de drenaje, el coeficiente estructural de cada capa y el espesor de cada una de estas, para determinar el número estructural de diseño en el caso del pavimento flexible; y por supuesto, los valores de módulo de resiliencia y módulo de reacción de las subrasante.

Es importante señalar que también existen otras variables a tomar en cuenta como: el clima de la zona de construcción, el nivel de tráfico que circulará por la carretera, el periodo de diseño y los niveles de confianza y desviación estándar; que van en función de la variabilidad de las propiedades de los materiales de construcción.

Tomando en cuenta que en cada uno de los proyectos que se llevan a cabo, en todo el territorio nacional, no siempre se puede contar con el tipo de material de alta calidad que el ejecutor desea tener, pero siempre es importante tratar la manera de controlar las técnicas de compactación de las diferentes capas, para así, optimizar al máximo las características físicas y mecánicas de los materiales con las que se cuentan en el proyecto, y así, estas puedan soportar de manera eficiente los esfuerzos transmitidos a toda la estructura.

OBJETIVOS

- **GENERAL**

Crear una guía práctica que permita al ingeniero y al estudiante una ayuda en el diseño de estructuras de pavimento, ya sean estas rígidas o flexibles; pudiendo asumir correctamente los valores y parámetros adecuados a su caso.

- **ESPECÍFICOS**

1. Saber y poder determinar los parámetros iniciales que se deben tener en cuenta, así como, los ensayos de laboratorio que se tienen que llevar a cabo para diseñar una estructura de pavimento de alta calidad y duradera.
2. Tener conocimiento de las características a tomar en cuenta del material de subrasante, para la construcción de carreteras. Sabiendo decidir qué tipo de módulo proporcionado por la subrasante se debe utilizar.
3. Complementar la información existente y orientarla de una manera mucho más simplificada, para los diseños de estructuras de carretera que soportan a diario las distintas cargas que aplican los vehículos sobre estas.

INTRODUCCIÓN

Para todo proyecto de obra civil, es necesario conocer las propiedades físicas y mecánicas de los suelos sobre los cuales se construirá la obra. En el caso de las carreteras, no son la excepción, ya sean estas de pavimento rígido o flexible, es importante tomar en cuenta las características de los suelos que conformarán los diferentes tipos de capas, en especial el módulo de resiliencia y el módulo de reacción de los materiales que servirán para subrasante, ya que estos parámetros nos permitirán diseñar la estructura de la carretera.

En la actualidad el tema del diseño de estructuras de pavimento está orientado fundamentalmente a la rehabilitación y reconstrucción de carreteras ya existentes, y en menor medida al diseño y construcción de nuevos proyectos. En virtud de esta realidad, no muchos ingenieros o bien diseñadores de pavimento conocen los pasos a seguir para el diseño de uno nuevo.

En este trabajo de investigación se pretende que el lector aprenda a determinar cada uno de los parámetros necesarios para el diseño de una estructura de pavimento, así como, todos los aspectos que son determinantes para que la estructura sea de gran calidad y lo más duradera posible.

Como método principal de diseño se hará referencia al método de la AASHTO del año 1993, actualmente vigente y que se fundamenta en la instrumentación y observación de tramos experimentales, y se complementa con métodos y modelos para el análisis de capacidad a fatiga de las capas constitutivas de la estructura del pavimento.

Se comprenderá los aspectos relacionados con el diseño y refuerzo de los pavimentos, tomando como base las cargas inducidas por el tránsito vehicular, el análisis de reacciones en la subrasante y sus deformaciones, partiendo del comportamiento multicapa para el dimensionamiento del espesor de las capas de pavimento, tanto para carreteras de concreto hidráulico como para carreteras de mezcla asfáltica.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Antecedentes

Desde la época del imperio romano, el hombre ha tratado de crear caminos de fácil transitar para trasladarse de un lugar a otro, y para ello, ha aplicado diversas técnicas en la creación de caminos y carreteras como las conocemos hoy en día. Entre 1898 y 1944 ocurrieron en el mundo de la construcción de carreteras muchos cambios tecnológicos, tanto en el equipo utilizado para prestar los servicios de transporte como en diversos sistemas de transporte mismo.

Tales cambios dieron lugar a importantes reducciones de tiempo en los traslados, y algo aun mejor, disminuir el riesgo durante el traslado de personas y mercadería, y por supuesto, los costos y los vehículos.

A principios del siglo pasado se da el comienzo de la utilización del automóvil, pero las carreteras eran muy irregulares para tal medio de transporte y en algunas zonas montañosas muchas de las pendientes variaban entre valores de 10% y 20% lo cual hacía difícil transitarlas en épocas de lluvia. A finales de 1920 los gobiernos de la región de Centro América, le cedieron la importancia que se merecía a las carreteras nuevas, así como el mejoramiento y ampliación de antiguos tramos.

En el año de 1945 se llegó a considerar que la red vial en toda Centro América ya rebasaba los 40 000 km de tramos carreteros, pero solo quizá el 10% tenía una carpeta de rodadura. En 1960, la red vial de Centro América,

implementó notablemente el espacio geográfico económico, lo que dio como resultado una ampliación del mercado y una protección efectiva de los productos del área, frente a los provenientes del exterior.

Para el año de 1970 Centro América ya contaba con un inventario de carreteras según su tipo de rodadura.

Tabla I. Longitud de carreteras en Centro América para 1970

| TIPO DE CARRETERA | LOGITUD (km) |
|--|---------------------|
| Pavimentada, superficie de asfalto y de cemento Portland | 6 719 |
| De grava, piedra o suelo estabilizado | 13 910 |
| De tierra transitable todo el tiempo | 11 395 |
| De tierra transitable en estación seca | 29 499 |
| TOTAL | 61 514 |

Fuente: Manual Centroamericano para diseño de pavimento, 2001.

En general, Centro América se ha venido desarrollando, debido a que tiene que mejorar su posición económica regional e internacional, es en la ampliación de sus comunicaciones principales hacia los puestos fronterizos y zonas de comercio con los países, como también en los puertos de ambos océanos.

Hasta el año 2001 Guatemala poseía 2 736 km de carretera de mezclas asfáltica, 60 km de carretera de concreto hidráulico, 2 239 km de carretera con tratamiento superficial, 9 303 km de carretera constituídos de grava o tierra, en total tenía 13 603 km de carretera construída, siendo uno de los países en el área con más kilómetros de construcción vial.

En nuestro medio, los métodos o técnicas más utilizadas se toman de la guía para diseño de estructuras de pavimento rígido y flexible de la AASHTO edición de 1993.

Aunque también existe el manual para diseño de espesores de pavimento asfáltico del Instituto de Asfalto de Estados Unidos de Norte América, en Guatemala no es muy utilizado. También existe la guía para diseño y construcción de pavimentos rígidos del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, siendo un poco más conocido; aunque, también se basa en la guía de la AASHTO.

En estos métodos mencionados para el diseño de pavimentos, tanto flexible como rígido, se basa en el valor del módulo de resiliencia para pavimento flexible y el módulo de reacción para el pavimento rígido. Ambos módulos se encuentran a partir del C.B.R.; aunque, el módulo de resiliencia también se puede encontrar mediante el ensayo de compresión triaxial cíclico, se enfocará más en los resultados obtenidos a partir del valor soporte del ensayo de C.B.R., debido a la carencia de equipo apropiado en nuestro medio para el ensayo de compresión triaxial cíclico.

El módulo de resiliencia y el módulo de reacción, que se obtiene para dicho diseño, son los de la capa de subrasante, debido a que por lo regular, esta capa está compuesta por material cohesivo, el cual mantiene un nivel de elasticidad estando sometido a cargas que ejercen presión sobre él, y al ser retirada la carga, este regresa a un estado inicial; dicho proceso repetidamente, hace que la elasticidad se vaya perdiendo poco a poco, característico de los suelos cohesivos.

1.2. Suelos cohesivos

En el caso de la subrasante, esta se conoce como la parte del lecho de la carretera sobre la que se construyen las capas: base, sub-base y superficie; la cual sirve de asentamiento a la estructura de pavimento después de haber sido terminado. Por lo regular, se tiene por entendido que un material para subrasante, es un tipo de suelo cohesivo, debido a sus propiedades resilientes.

Una característica que hace muy distintivos a diferentes tipos de suelos, es la cohesión, debido a ella los suelos se clasifican en "cohesivos" y "no cohesivos". Los suelos cohesivos son los que poseen la propiedad de atracción intermolecular, como por ejemplo: los limos y las arcillas.

El término cohesivo ha sido utilizado tradicionalmente en mecánica de suelos, con referencia a aquellos suelos que sin presión normal exterior apreciable, presentan características de resistencia a los esfuerzos cortantes.

El término nació porque se pensaba que estos suelos tenían "cohesión", es decir, se creía en la presencia de una especie de liga entre las partículas constituyentes, lo cual hoy en día la denominación prevalece, aun cuando está establecido que la resistencia de estos suelos tiene, esencialmente, la misma génesis que en los suelos granulares, la cual es la fricción. En una muestra de suelo, aun no existiendo presiones exteriores, la estructura está sujeta a presiones intergranulares, a causa sobre todo, de efectos capilares, donde estas presiones hacen posible la generación de un mecanismo de fricción entre las partículas de un material.

1.2.1. Limos

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico, como el producido en las canteras, o limo orgánico, como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0,05 mm y 0,005 mm.

Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

1.2.2. Arcillas

Se le da el nombre de arcillas a las partículas sólidas con diámetro menor a 0,005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado; aunque en no pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratado. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada, y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de láminas: el tipo silicio y el tipo alumínico.

Una lámina del tipo silícico se encuentra formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro átomos de oxígeno, arreglándose el conjunto en forma de tetraedro. Estos tetraedros se agrupan entre sí formando una unidad hexagonal,

la cual se repite indefinidamente constituyendo una red de láminas. La unión entre cada dos tetraedros se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno. Algunas entidades consideran como arcillas a las partículas menores a 0,002 mm.

Una lámina del tipo aluminico está formada por un átomo de aluminio, rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno común e hidrógeno, arreglándose el conjunto en forma de octaedro, los cuales se agrupan entre sí mediante un átomo común de oxígeno, repitiéndose la formación indefinidamente, dando como resultado una red de láminas aluminicas.

En suelos cohesivos, es mucho más difícil la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante que en los suelos friccionantes, pero a su vez, es mucho más sencillo determinar su módulo de resiliencia, debido a su plasticidad y a la diversa metodología que existe para encontrar dicho módulo.

1.3. Suelos granulares

El concepto de suelo granular, es bastante difuso, y más bien coloquial. Para definir una característica granulométrica, debido a la relación del tamaño de las partículas a las que se refiere, existen dos divisiones: las gravas y las arenas, siendo estas muy permeables, por lo que el agua escapa rápidamente a través de sus poros al someterlo a deformaciones por aplicación de carga.

1.3.1. Gravas

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas, que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas, las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, en las márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares en los cuales las gravas han sido transportadas.

Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas varían desde 7,62 cm (3") hasta 2,00 mm. La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica dependen de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.

1.3.2. Arenas

Arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2,00 mm y 0,05 mm de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas, por lo regular las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas; son

mucho menos compresibles que las arcillas y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

1.4. Clasificación de los suelos

En nuestro medio se utilizan dos métodos muy conocidos para la clasificación de los suelos, los cuales son, el método de la AASHTO y el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelo.

El ingeniero de fundaciones acostumbra a hacer una inspección visual como base primaria de clasificaciones, pero su terminología, es muy similar a la del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Todos los sistemas de clasificación de interés primordial para el ingeniero geotécnico utilizan los Límites de Atterberg (por lo menos los límites líquidos y plásticos), con un análisis total o parcial de granulometría, y el proceso para la eliminación de un suelo. En todos los sistemas de clasificación es absolutamente esencial acompañar el símbolo de clasificación con la descripción debida del suelo, pues el símbolo particular del grupo es demasiado amplio y general como criterio de clasificación para suelos específicos.

1.4.1. Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO

El sistema de clasificación de la AASHTO provee una forma de utilizar los límites plástico y líquido para obtener la clasificación de los suelos entre los grupos A-4 y A-7, para los cuales el hecho de tener más de un 35% de material fino que pasa el tamiz No. 200, es un factor esencial de clasificación. Este factor

también puede utilizarse para obtener la clasificación de subgrupo de los titulados A-2, para los cuales el hecho de tener menos del 35% de material más fino que el tamiz No. 200, es un factor esencial de clasificación.

La designación de los subgrupos en el grupo A-2 se logra determinando si el suelo es A-2 clasificado de acuerdo con su análisis granulométrico, pero si tiene propiedades plásticas (LL y LP) características de los suelos A-4, A-5, A-6 ó A-7. Se utiliza procedimiento de izquierda a derecha hasta encontrar el primer tipo de suelo que tenga las propiedades del suelo en consideración. El suelo tipo A-8 no se muestra en la tabla de clasificación; pero se clasifica como turba (material excesivamente orgánico).

El sistema de clasificación de la AASHTO utiliza además un índice de grupo para comparar diferentes suelos dentro de un mismo grupo. El índice encontrado se redondea al entero siguiente y se reemplaza entre paréntesis después del número de clasificación correspondiente de la siguiente forma:

A-2-6(3)

Clasificando de esta manera el suelo como un material del grupo A-2 con propiedades plásticas del grupo A-6 y con un índice de grupo de 3.

El índice de grupo (IG) es una modificación de la AASHTO a la clasificación original BPR, para establecer una categoría dentro de la clasificación de grupo. Si dos suelos de un mismo grupo tienen diferente índice de grupo, tendrá mejor comportamiento como material de carretera aquél cuyo índice de grupo sea menor, como por ejemplo: si tenemos un suelo A-2-6(2) debe ser mejor material de carretera que un suelo A-2-6(4).

La ecuación para establecer el índice de grupo es la siguiente.

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

Donde:

IG: Índice de grupo

F: Porcentaje que pasa el tamiz No. 200, expresado como un número entero

LL: Límite líquido

IP: Índice de plasticidad

Nota:

El índice de grupo en los subgrupos A-2-6 y A-2-7, deben calcularse sólo utilizando sólo la porción del IP de la fórmula.

La siguiente figura muestra la clasificación de los suelos y agregados según la AASHTO;

Figura 1. Clasificación de suelos método AASHTO

| Clasificación general | Materiales granulares (35% o más pasa el tamiz #200) | | | | | | | Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200) | | | |
|-------------------------------------|---|---------|------------------|------------------------------|---------|---------|---------|--|---------|-------------------|-----------------------|
| | A-1 | | A-3 ^A | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7.5 A-7.6 |
| | A-1.a | A-1.b | | A-2.4 | A-2.5 | A-2.6 | A-2.7 | | | | |
| Tamizado, % que pasa | | | | | | | | | | | |
| No. 10 (2.0mm) | 50 máx. | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| No. 40 (425µm) | 30 máx. | 50 máx. | 51 mín. | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| No. 200 (75µm) | 15 máx. | 25 máx. | 10 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 35 máx. | 36 mín. | 36 mín. | 36 mín. |
| Consistencia | | | | | | | | | | | |
| Límite líquido | ... | ... | ... | B | | | | 40 máx. | 41 mín. | 40 máx. | 41 mín. |
| Índice de plasticidad | 6 máx. | N.P. | ... | B | | | | 10 máx. | 10 máx. | 11 mín. | 11 mín. ^B |
| Tipos de materiales característicos | Cantos, grava y arena | | Arena fina | Grava y arena limoarcillosas | | | | Suelos limosos | | Suelos arcillosos | |
| Calificación | Excelente a bueno | | | | | | | Regular a malo | | | |

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

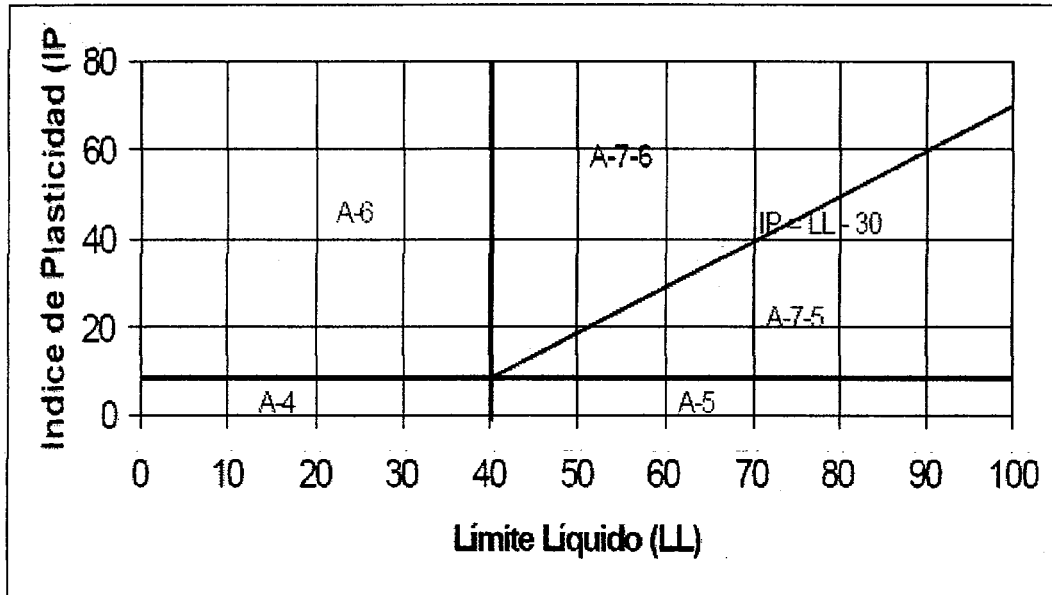
^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7.5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7.6 es mayor que LL-30.

Fuente: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, Joseph E. Bowles, 1980, página 70.

Para los materiales que poseen más del 35% pasa del tamiz No. 200, y en especial caso, los subgrupos del grupo A-7, se apoyan en una carta de plasticidad que toma los parámetros del límite líquido e índice de plasticidad para poder clasificarlos correctamente.

La siguiente figura muestra la carta de plasticidad para suelos que contienen más de 35% de pasa tamiz No. 200.

Figura 2. Carta de plasticidad



Fuente: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil, Joseph E. Bowles, 1980, página 75.

1.4.2. Sistema de clasificación unificado de suelos

Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande, como una modificación y adaptación más general a su sistema propuesto en el año 1942, para la construcción de aeropuertos en Estados Unidos. Actualmente, este sistema se utiliza con modificaciones mínimas en la mayoría de los países fuera de los Estados Unidos y Guatemala no es la excepción, donde el sistema es ampliamente utilizado. Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos

Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz No. 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los finos a los que pasan, de esta forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz No. 200, y finos si más del 50% de sus partículas son menores de dicho tamiz.

Los suelos se designan por símbolos de grupo, donde el símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en inglés de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.

Los suelos gruesos se dividen en gravas y arenas, y se separan con el tamiz No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava (G) si más del 50% queda retenido en el tamiz No. 4, y pertenecerá al grupo de arena (S) en caso contrario.

El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcilla inorgánica (C) y limos, y arcillas orgánicas(O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $LL = 50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade el símbolo general de la letra L (low compressibility), y si es mayor de 50 se añade la letra H (high compressibility).

Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML: limos inorgánicos de baja compresibilidad

MH: limos inorgánicos de alta compresibilidad

OL: limos y arcillas orgánicas

CL: arcillas inorgánicas de baja compresibilidad

CH: arcillas inorgánicas de alta compresibilidad

OH: arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad

Las gravas con 5 a 12% de finos requieren el uso de símbolos dobles: GW-GM grava bien graduada con limo; GW-GC grava bien graduada con arcilla; GP-GM grava mal graduada con limo; GP-GC grava mal graduada con arcilla.

Las arenas con 5 a 12% de finos requieren el uso de símbolos dobles: SW-SM arena bien graduada con limo; SW-SC arena bien graduada con arcilla; SP-SM arena mal graduada con limo; SP-SC arena mal graduada con arcilla.

Este sistema también utiliza dos tipos de coeficientes:

El coeficiente de uniformidad (C_u) indica que tan uniforme son las partículas de suelos con respecto a su diámetro; pero en realidad podría decirse que es de no uniformidad, porque mientras menos se acerca al uno mejor es el suelo, debido a que el tamaño de las partículas está mejor distribuido en la muestra. El (C_u) está dado por la siguiente expresión:

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

Donde:

C_u : Coeficiente de uniformidad

D60: diámetro efectivo del 60% (tamaño correspondiente al 60% del porcentaje que pasa por el tamiz, obtenido de la curva granulométrica)

D10: diámetro efectivo del 10% (tamaño correspondiente al 10% del porcentaje que pasa por el tamiz, obtenido de la curva granulométrica)

El coeficiente de curvatura (Cc), da la pauta de interpretar la correcta distribución de las partículas mediante la tendencia que tiene la curva granulométrica, es por ello que intervienen en la fórmula tres porcentajes de diámetros para verificar una misma tendencia en la curva. El (Cc) está dado por la siguiente expresión:

$$Cc = D_{30}^2 / D_{60} * D_{10}$$

Donde:

Cc: Coeficiente de curvatura

D30: diámetro efectivo del 30% (tamaño correspondiente al 30% del porcentaje que pasa por el tamiz, obtenido de la curva granulométrica)

D60: diámetro efectivo del 60% (tamaño correspondiente al 60% del porcentaje que pasa por el tamiz, obtenido de la curva granulométrica)

D10: diámetro efectivo del 10% (tamaño correspondiente al 10% del porcentaje que pasa por el tamiz, obtenido de la curva granulométrica)

La siguiente gráfica muestra cada uno de los suelos con su respectivo símbolo y la descripción de cada uno de ellos.

Figura 3. Sistema unificado de clasificación de suelos

**SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN**

| DIVISIÓN MAYOR | | NOMBRES TÍPICOS | | CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO | | | |
|--|--|---|--|--|---|---|---|
| SUELOS DE PARTÍCULAS GRANES <small>Más de la mitad del material es retenido en el tambo 2000 (Ø)</small> | ARGILLAS <small>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tambo (Ø) 4</small> ARGILLAS <small>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tambo (Ø) 4</small> ARGILLAS <small>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tambo (Ø) 4</small> | GW | Gravas bien graduadas con arena y arena con poca o nada de limo | <small>INDEPENDIENDO DEL PROCEDIMIENTO DE TAMAÑO DE LA TUBERÍA INVESTIGADA, LOS SUELOS DEPARTÍCULAS GRANES SE CLASIFICAN EN GRUPOS DE SUELOS DEPARTÍCULAS GRANES EN FUNCIÓN DE SU CONTENIDO EN ARGILA Y LIMO. PARA LOS SUELOS DEPARTÍCULAS GRANES SE DEBE USAR EL MÉTODO DE TAMAÑO DE TUBERÍA DE 2000 (Ø) PARA DETERMINAR EL CONTENIDO EN ARGILA Y LIMO.</small> | COEFICIENTE DE IMPERMEABILIDAD C_u mayor de 6 COEFICIENTE DE CLASIFICACIÓN C_c menor de 1 y 2 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $C_c = \frac{D_{30}^2 - D_{10}D_{60}}{D_{10}^2}$ | | |
| | | GP | Gravas mal graduadas, arena y arena con poca o nada de limo | | | NO SATISFACEN NINGUNO DE LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW. | |
| | | GM | Gravas limosas, arenas de gravas, arena y limo | | LÍMITES DE ATERRIQUO ABASO DE LA "LÍNEA A" DE 4 MENOR QUE 6 Y MAYOR QUE 5 | Área de la "línea A" y con 17 entre 6 y 7 con casos de excepción que requieren el uso de métodos de prueba. | |
| | | | | | | | GC |
| | | MH | Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de limo | | LÍMITES DE ATERRIQUO ABASO DE LA "LÍNEA A" DE 4 MENOR QUE 6 Y MAYOR QUE 5 | Área de la "línea A" y con 17 entre 6 y 7 con casos de excepción que requieren el uso de métodos de prueba. | |
| | | | | | | | ML |
| | | SH | Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de limo | | LÍMITES DE ATERRIQUO ABASO DE LA "LÍNEA A" DE 4 MENOR QUE 6 Y MAYOR QUE 5 | Área de la "línea A" y con 17 entre 6 y 7 con casos de excepción que requieren el uso de métodos de prueba. | |
| | | | | | | | SM |
| | | SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS <small>Más de la mitad del material pasa por el tambo 2000 (Ø)</small> | ARGILLAS <small>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tambo (Ø) 4</small> ARGILLAS <small>Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tambo (Ø) 4</small> | | <small>INDEPENDIENDO DEL PROCEDIMIENTO DE TAMAÑO DE LA TUBERÍA INVESTIGADA, LOS SUELOS DEPARTÍCULAS FINAS SE CLASIFICAN EN GRUPOS DE SUELOS DEPARTÍCULAS FINAS EN FUNCIÓN DE SU CONTENIDO EN ARGILA Y LIMO. PARA LOS SUELOS DEPARTÍCULAS FINAS SE DEBE USAR EL MÉTODO DE TAMAÑO DE TUBERÍA DE 2000 (Ø) PARA DETERMINAR EL CONTENIDO EN ARGILA Y LIMO.</small> | CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.) | |
| | | | | | | | ML |
| CL | Arcillas marginales de baja a mediana plasticidad, arcillas marginales arenosas o arcillosas, limos arcillosos de baja plasticidad | | | | | | |
| CH | Arcillas marginales y arcillas limosas arcillosas de alta plasticidad | | | | | | |
| MH | Limos marginales, limos marginales o arcillosos, arcillosos marginales | | | LÍMITES DE ATERRIQUO ABASO DE LA "LÍNEA A" DE 4 MENOR QUE 6 Y MAYOR QUE 5 | | | Área de la "línea A" y con 17 entre 6 y 7 con casos de excepción que requieren el uso de métodos de prueba. |
| | | | | | | | |
| SH | Arcillas marginales de media a alta plasticidad, limos arcillosos de media plasticidad | | | LÍMITES DE ATERRIQUO ABASO DE LA "LÍNEA A" DE 4 MENOR QUE 6 Y MAYOR QUE 5 | | | Área de la "línea A" y con 17 entre 6 y 7 con casos de excepción que requieren el uso de métodos de prueba. |
| | | | | | | | |
| U | Turbas y otros suelos altamente orgánicos | | | | | | |

Fuente: Manual de laboratorio de suelos de ingeniería civil, Joseph E. Bowles, 1980, página 74.

Si los límites de Atterberg se sitúan en el área sombreada de la carta de plasticidad, el suelo es una arcilla limosa CL-ML.

Si el suelo contiene $\geq 15\%$ de arena, añade "con arena" al nombre del grupo.

Si el suelo contiene $\geq 15\%$ de grava, añade "con grava" al nombre del grupo.

Si el suelo contiene de 15 a 29% mayor de malla No. 200 añade "con arena" o "con grava", el que sea predominante.

Si el suelo contiene $\geq 30\%$ mayor de la malla No. 200, predominantemente arena, añade "arenoso" al nombre del grupo.

Si el suelo contiene $\geq 30\%$ mayor de la malla No. 200, predominantemente grava, añade "gravoso" al nombre del grupo.

1.5. Propiedades físicas de los suelos granulares y cohesivos

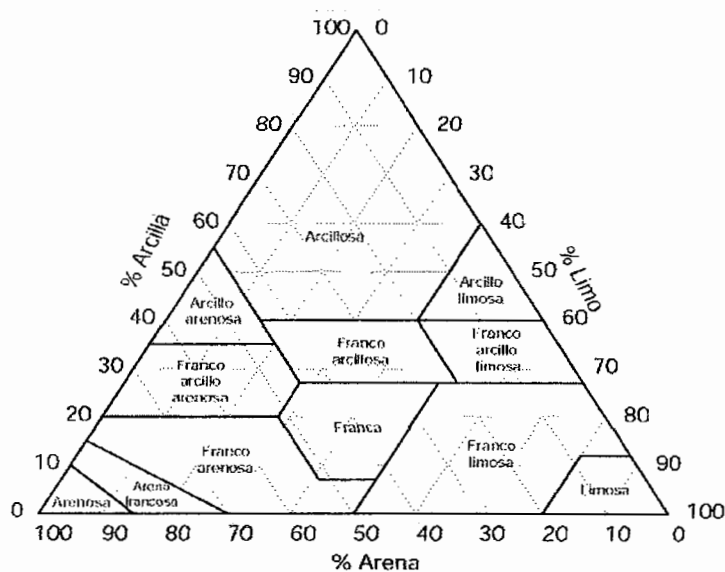
Los suelos son una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La adecuada relación entre estos componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas o mecánicas de los suelos. Entre las propiedades físicas de los suelos podemos mencionar la textura, la estructura, la permeabilidad, la porosidad, la densidad aparente, el color y el calor.

1.5.1. Textura

La textura de un suelo es la proporción de los tamaños de los grupos de partículas que lo constituyen, y está relacionado con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman, y se refleja a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo.

Este término se utiliza para representar la composición granulométrica del suelo. Cada término textural corresponde con una determinada composición de arena, limo y arcilla. En los términos de textura se prescinde de los contenidos de gravas. Por ejemplo, un suelo que contiene un 25% de arena, 25% de limo y 50% de arcilla se dice que tiene una textura arcillosa. Los términos texturales se definen de una manera gráfica en un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones.

Figura 4. Triángulo de textura de suelos



Fuente: Clasificación USDA, figura 2, triángulo textural.

1.5.2. Estructura

La estructura es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo con esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos).

La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados.

La estructura de un suelo también se puede clasificar por su grado, clase y tipo.

1.5.2.1. Grados de estructura del suelo

El grado de estructura es la intensidad de agregación y expresa la diferencia entre la cohesión y la adhesividad entre ellos. Debido a que estas propiedades varían según el contenido de humedad del suelo, el grado de estructura debe determinarse cuando el suelo no esté exageradamente húmedo o seco. Existen cuatro grados fundamentales de estructura que se clasifican de la manera siguiente:

- a) Sin estructura: condición en la que no existen agregados visibles o bien hay un ordenamiento natural de línea de debilidad, tales como:

- Estructura de aglomerado (coherente): donde todo el horizonte del suelo aparece cementado en una gran masa
 - Estructura de grano simple (sin coherencia): donde las partículas individuales del suelo no muestran tendencia a agruparse, como la arena pura
- b) Estructura débil: está deficientemente formada por agregados indistintos apenas visibles. Cuando se extrae del perfil, los materiales se rompen dando lugar a una mezcla de escasos agregados intactos, muchos quebrados y mucho material no agregado.
- c) Estructura moderada: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados de duración moderada, y evidentes aunque distintos en suelos no alterados.
- d) Estructura fuerte: se caracteriza por agregados bien formados y diferenciados que son duraderos y evidentes en suelos no alterados. Cuando se extrae del perfil, el material está integrado principalmente por agregados enteros e incluye algunos quebrados y poco o ningún material no agregado.

1.5.2.2. Clases de estructura del suelo

La clase de la estructura de un suelo describe el tamaño medio de los agregados individuales. En relación con el tipo de estructura de suelo de donde proceden los agregados, se pueden reconocer en general cinco clases distintas:

- Muy fina o muy delgada
- Fina o delgada
- Mediana
- Gruesa o espesa
- Muy gruesa o muy espesa

1.5.2.3. Tipos de estructura del suelo

El tipo de estructura describe la forma o configuración de los agregados individuales. Aunque generalmente los técnicos en suelos reconocen siete tipos de estructura del suelo, en esta ocasión describiremos cuatro de ellas:

- a) Estructuras granulares y migajosas: son partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos.
- b) Estructuras en bloques o bloques subangulares: son partículas de suelo que se agrupan en bloques casi cuadrados angulares con los bordes más o menos pronunciados. Los bloques relativamente grandes indican que el suelo resiste la penetración y el movimiento del agua.
- c) Estructuras prismáticas y columnares: son partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente.
- d) Estructura laminar: se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. A menudo las láminas se traslapan, lo que dificulta notablemente la circulación del agua.

1.5.3. Porosidad

Como consecuencia de la textura y estructura del suelo tenemos su porosidad, es decir, su sistema de espacios vacíos o poros.

Los poros en suelo se distinguen en macroscópicos y microscópicos:

Los primeros de notable dimensiones están generalmente llenos de aire, por lo tanto el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

Los terrenos arenosos son ricos en macroporos, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tiene una muy baja capacidad de retener el agua, mientras que, los suelos arcillosos son ricos en microporos, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua.

La porosidad puede ser determinada por la siguiente fórmula:

$$P = \frac{(S - S_a)}{S} * 100$$

Donde:

P: Porosidad en porcentaje del volumen total de la muestra

S: Densidad real del suelo

S_a: Densidad aparente del suelo

En líneas generales la porosidad varía dentro de los siguientes rangos.

- Suelos ligeros: 30 – 45%
- Suelos medios: 45 – 55%
- Suelos pesados: 50 – 65%
- Suelos turbosos: 75 – 90%

1.5.4. Permeabilidad

Es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire, y es una de las cualidades más importantes que han de considerarse para la ingeniería. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de obra civil, es preciso aplicar técnicas de construcción especiales.

El tamaño de los poros del suelo tiene gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros tienen una estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

Tal y como se muestra en la tabla II, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad.

Tabla II. Textura contra permeabilidad

| | |
|---|------------|
| Arenosos | 5,0 cm/hr |
| Franco arenosos (75% arena, 5% arcilla y 20% limo) | 2,5 cm/hr |
| Franco (45% arena, 40% limo y 15% arcilla) | 1,3 cm/hr |
| Franco arcillosos (45% arcilla, 30% limo y 25% arena) | 0,8 cm/hr |
| Arcilloso limosos | 0,25 cm/hr |
| Arcilloso | 0,05 cm/hr |

Fuente: monografias.com

1.5.5. Color

El color del suelo depende de sus componentes, y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. El color varía con el contenido de humedad. El color rojo indica contenido de óxido de hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y el gris por ejemplo indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; y el negro y marrón indican materia orgánica.

Es una propiedad muy utilizada al estudiar los suelos pues, es fácilmente observable, y a partir de él se pueden deducir rasgos importantes.

1.5.6. Consistencia

La consistencia, es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión y adhesión, responsables del suelo a ser moldeado o roto.

Dichas fuerzas dependen del contenido de humedad, por esta razón la consistencia se debe expresar en términos de seco, húmedo y mojado.

La consistencia se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada. Las fuerzas que causan la consistencia son la cohesión o adhesión.

1.5.6.1. Cohesión

Esta fuerza es debida a atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte y la atracción de masas por otra, además de estas fuerzas, otros factores, tales como: compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio, son agentes que integran el mantenimiento conjunto de las partículas.

La cohesión, es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

1.5.6.2. Adhesión

Se debe a la tensión superficial que se presenta entre las partículas de suelo y las moléculas de agua. Sin embargo, cuando el contenido de agua aumenta excesivamente, la adhesión tiende a disminuir. El efecto de la adhesión es mantener unidas las partículas por lo cual depende de la proporción agua/aire.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que la consistencia del suelo posee dos puntos máximos: uno cuando está en estado seco, debido a la cohesión, y otro cuando está húmedo, que depende de la adhesión.

1.6. Propiedades mecánicas de los suelos granulares y cohesivos

Las propiedades mecánicas de los suelos suelen diferir frente a cargas que varían casi instantáneamente y cargas casi permanentemente. Esto se debe a que los terrenos son porosos, y estos poros pueden estar total o parcialmente saturados de agua. En general los terrenos se comportan de manera más rígida frente a cargas de variación casi instantánea, ya que éstas aumentan la presión intersticial, sin producir el desalojo de una cantidad apreciable de agua. En cambio bajo cargas permanentes la diferencia de presión intersticial entre diferentes partes del terreno produce el drenaje de algunas zonas.

Los suelos poseen ciertas propiedades mecánicas que varían dependiendo del tipo del suelo, ya sean estos suelos finos, fino-granulares o granulares. Algunas de las propiedades mecánicas que más importancia tienen sobre el uso del terreno en el que se va a construir esta: la capacidad de carga admisible, la resistencia al corte y el desgaste mecánico.

1.6.1. Capacidad de carga admisible

Es la capacidad que cualquier suelo posee para soportar cargas aplicadas sobre él. Técnicamente, la capacidad de carga admisible de un suelo (también conocida como carga portante), es la máxima presión medida de contacto entre la cimentación y el terreno, tal que no se produzca un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo.

Por consiguiente, la capacidad portante admisible debe estar basada en uno de los siguientes criterios funcionales:

- Si la función del terreno de cimentación es soportar una determinada tensión independientemente de la deformación, la capacidad portante se denominará carga de hundimiento.
- Si lo que se busca es un equilibrio entre la tensión aplicada al terreno y la deformación sufrida por éste, deberá calcularse la capacidad portante a partir de criterios de asiento admisible.

En la siguiente tabla se describe el tipo de suelo con sus respectivos rangos de capacidad portante.

Tabla III. Capacidad de carga admisible de los suelos

| Tipo de suelo | Capacidad portante (kg/cm ²) |
|-----------------------------------|--|
| Roca dura | 20 – 50 |
| Roca blanda | 7 – 25 |
| Gravilla | 5 – 7 |
| Arena de cantos rodados | 4 – 5 |
| Arena fina | 2 – 3 |
| Arena movediza | 0 – 3 |
| Limo | 2 – 3 |
| Arcilla húmeda | 0.5 – 1 |
| Arcilla seca o ligeramente húmeda | 2 – 3 |
| Fango | 0 |

Fuente: scribd.com

1.6.2. Resistencia al corte

La resistencia de corte del suelo se contempla con algunas suposiciones con respecto al carácter de una falla del terraplén. Cuando una estructura se apoya en la tierra, transmite los esfuerzos al suelo de fundación. Estos

esfuerzos producen deformaciones en el suelo que puede darse de tres maneras:

- Por deformaciones elásticas de las partículas.
- Por cambio de volumen en el suelo como consecuencia de la evacuación del líquido existente en los huecos entre partículas.
- Por deslizamiento de las partículas, que pueden conducir al deslizamiento de una gran masa de suelo.

El primer caso es despreciable para la mayoría de los suelos, en los niveles de esfuerzo que ocurren en la práctica. El segundo caso corresponde al fenómeno de la consolidación. El tercer caso, corresponde a fallas de tipo catastrófico y para evitarla se debe hacer un análisis de estabilidad, que requiere del conocimiento de la resistencia al corte de un suelo.

Por tanto el problema de la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, puede decirse que constituye uno de los puntos fundamentales de toda la mecánica de suelos. Por lo que una valoración correcta de este concepto constituye un paso previo imprescindible, para intentar, con cualquier aplicación de la mecánica de suelos el análisis de la estabilidad de las obras civiles.

El corte directo, compresión triaxial y compresión simple, son algunos de los tipos de ensayos para determinar la resistencia al esfuerzo cortante en laboratorio.

1.6.3. Resistencia al desgaste mecánico

El desgaste mecánico, aunque se produce en todos los tipos de suelo expuestos a fricción, es una característica que está muy definida para los suelos de tipo granular, arenas y gravas específicamente.

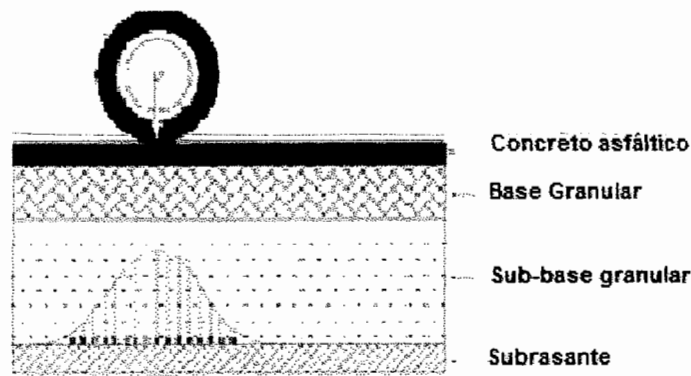
El desgaste de un material es puesto en evidencia con ensayos de abrasión, donde las partículas son expuestas a choques y fricción que simulan el desgaste que estas tendrán a lo largo del tiempo en una obra de construcción, como es el caso del material para las distintas capas en las carreteras.

1.7. Propiedades mecánicas de una carpeta de rodadura tipo flexible, (de cemento asfáltico)

Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos, teniendo comportamientos diferentes al aplicarles carga. En el caso de los pavimentos flexibles, la superficie de rodadura, al tener menos rigidez, se deforma más, y se producen tensiones mucho mayores en la capa de subrasante.

En la figura 5 se puede observar cómo se transmite la carga de la rueda de un vehículo hacia la capa de subrasante.

Figura 5. Reacción de la subrasante



Fuente: Sección de ingeniería civil del consejo departamental de Loreto del colegio de ingenieros del Perú.

Una carpeta de rodadura tipo flexible, es la capa final de la estructura de pavimento flexible, que en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades mecánicas de la carpeta y el rendimiento de la misma.

Esta carpeta debe ser resistente a las acciones tales como: el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos de agua, abrasión del tránsito, tensión y compresión por temperatura y por la carga misma de los vehículos.

Las propiedades mecánicas que se analizan para una carpeta de rodadura flexible son: modulo resiliente, resistencia a la tracción indirecta, deformaciones plásticas y la estabilidad.

1.7.1. Módulo resiliente

Una propiedad que caracteriza a las mezclas asfálticas es su módulo de rigidez, el cual puede determinarse en laboratorio mediante el ensayo de modulo de resiliencia, a diferentes frecuencias y temperaturas. A su vez, el módulo de rigidez es un parámetro de diseño, junto con el coeficiente de Poisson y el espesor de cada capa estructural del pavimento; son los factores de entrada para determinar las tensiones y deformaciones horizontales y verticales producidas en el pavimento, que permiten determinar su estructura y su vida útil en función de la cantidad de aplicaciones de carga resistidas antes que el pavimento fatigue.

El módulo de resiliencia en una mezcla asfáltica, se mide mediante el ensayo de tensión indirecta para varias temperaturas que permiten evaluar la susceptibilidad térmica del material.

A medida que un material está sujeto bajo cargas de forma repetida, este se deforma y se recupera cuando se quita la carga; sin embargo, el material nunca se recupera a su forma original y alguna deformación permanente ocurre. Esta deformación se denomina plástica, mientras que la deformación recuperable es la deformación resiliente. La magnitud relativa de las deformaciones plásticas y resiliente influyen en el comportamiento del material.

1.7.2. Resistencia a la tracción indirecta

Una carpeta de cemento asfáltico tiene cierta resistencia a la tracción indirecta, la cual es un parámetro importante de las mezclas asfálticas, puesto que caracteriza el fallo producido por tensiones de tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica cuando ésta es solicitada por cargas de tráfico.

1.7.3. Deformaciones plásticas

La resistencia a las deformaciones plásticas es una propiedad que debe ser analizada en el empleo de mezclas asfálticas densas, puesto que este tipo de mezclas son muy susceptibles a pequeñas variaciones en la composición de la mezcla o tipo de ligante empleado

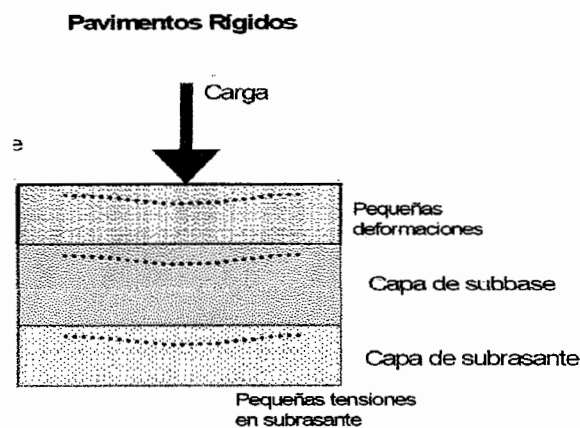
1.7.4. Estabilidad

La estabilidad es una propiedad de las capas de asfalto que permite determinar la resistencia a los esfuerzos inducidos por el tránsito que producen las deformaciones. Esta propiedad es de las más conocidas en nuestro medio, debido a que se obtiene con el ensayo de estabilidad Marshall, el cual implica aplicar esfuerzos de tensión-compresión a una probeta compactada en laboratorio bajo condiciones controladas.

1.8. Propiedades mecánicas de una carpeta de rodadura tipo rígida, (de concreto hidráulico tipo portland)

En un pavimento tipo rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas en cada una de las capas, dando como resultado tensiones muy bajas en la capa de subrasante.

Figura 6. Carga en pavimento rígido



Fuente: Manuel centroamericano para diseño de pavimentos, página 93.

Una carpeta de rodadura tipo rígida está construida con concreto hidráulico, por lo tanto, debido a su rigidez y gran módulo de elasticidad, basa su capacidad portante en la losa más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

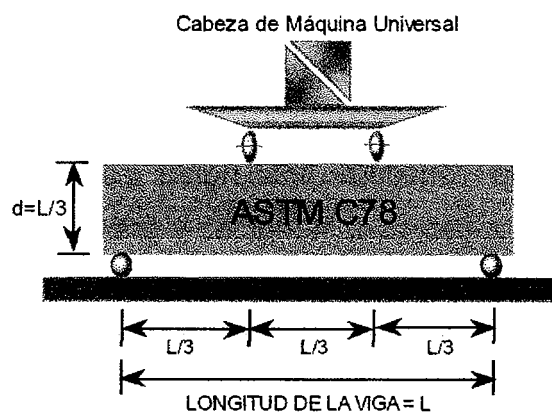
- Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) o módulo de ruptura (MR)
- Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

1.8.1. Módulo de ruptura (MR)

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se conoce como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o módulo de ruptura (MR), normalmente especificada a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto, aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo (Figura 7). Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera resultados diferentes de resistencia a la flexión (aproximadamente 15% a 20% mayores), pero este no lo considera la AASHTO para el diseño.

Figura 7. Ensayo de flexión de una viga de concreto hidráulico



Fuente: **Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 21.**

Los valores recomendados para el módulo de ruptura varían desde los 41 kg/cm² (583 psi) hasta los 50 kg/cm² (711 psi) a 28 días, dependiendo del uso que vayan a tener. A continuación, se muestran algunos valores

recomendados (Tabla IV); sin embargo, el diseñador deberá elegir de acuerdo con buen criterio.

Tabla IV. Valores de módulo de ruptura (MR) recomendados

| Tipo de pavimento | MR recomendado | |
|---------------------|--------------------|-------|
| | kg/cm ² | psi |
| Autopistas | 48,0 | 682,7 |
| Carreteras | 48,0 | 682,7 |
| Zonas industriales | 45,0 | 640,1 |
| Urbanas principales | 45,0 | 640,1 |
| Urbanas secundarias | 42,0 | 597,4 |

Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 21.

1.8.2. Módulo de elasticidad

Esta propiedad del concreto es muy importante para la predicción de las deflexiones producidas por cargas de corta duración en elementos a flexión.

El módulo de elasticidad se obtiene de la parte inicial de la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto, y aumenta con la resistencia del concreto a compresión.

El módulo de elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante las normas ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el módulo de elasticidad a partir del módulo de ruptura. Los dos más utilizados son:

- $E_c = 6\,750 \cdot MR$
- $E_c = 26\,454 \cdot MR^{0,77}$

También se puede relacionar con resultados en ensayos de comprensión según normas AASHTO T 22, T 140 y ASTM C39, mediante la fórmula siguiente.

- $E_c = 57\,000 \cdot (f_c)^{1/2}$

Estas fórmulas aplican con unidades inglesas.

2. PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

2.1. Consideraciones de diseño

Las variables que deben considerarse para el diseño de estructuras de pavimento son analizadas fundamentalmente con la problemática que representa el comportamiento de los pavimentos debido al tránsito, ya que este se incrementa conforme el desarrollo industrial de los países y su respectivo crecimiento demográfico, lo que constituye cada vez mayor incremento en las repeticiones de ejes y cargas.

Para el diseño de estructuras de pavimento es necesario tener conocimientos sobre el tránsito de vehículos, factores de medio ambiente, condiciones de la subrasante y calidad de los materiales que se utilizarán. Para la realización de este trabajo se consideran las siguientes variables de diseño.

- Desempeño del tipo de pavimento
- Tráfico
- Suelo de subrasante
- Materiales de construcción
- Medio ambiente
- Confiabilidad
- Serviciabilidad
- Transferencia de carga (para estructura de pavimentos rígidos)

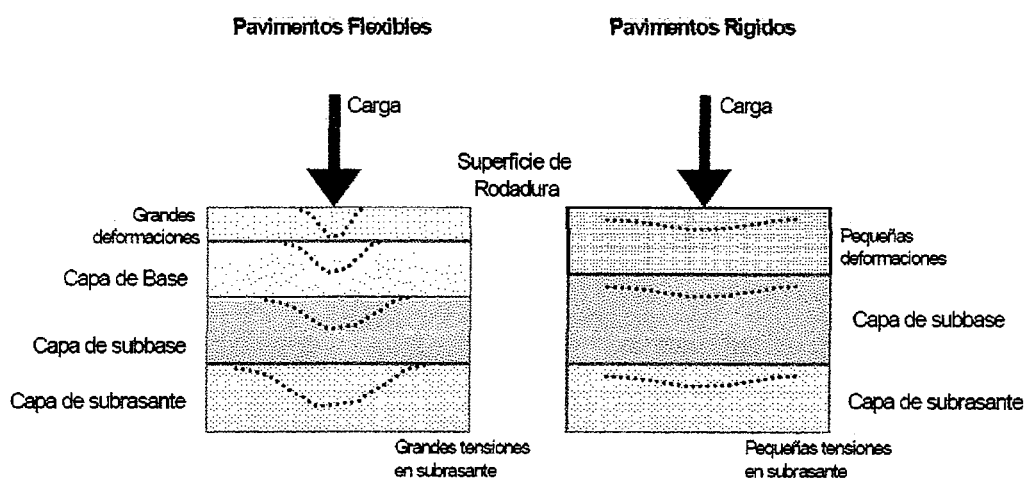
2.1.1. Desempeño del tipo de pavimento

De acuerdo con aspectos como lugar, costos y vida útil del diseño de la estructura del pavimento, se deberá tomar la decisión del tipo de pavimento a construir, para después hacer las consideraciones correspondientes en las ecuaciones que se utilizarán dependiendo del tipo de estructura por la cual se haya tomado la decisión.

Hay que tomar en cuenta que existe diferencia en el comportamiento de una estructura de pavimento flexible con respecto a una rígida, así como el número de capas en dicha estructura, como se ve en la siguiente figura.

Figura 8. Comportamiento en las estructuras de los pavimentos

Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos



Fuente: Manual centroamericano para diseño de pavimentos, página 93.

En la gráfica anterior se puede observar que en la estructura de pavimento flexible además de la capa de rodadura, se encuentran también las capas de base, sub-base y subrasante, mientras que, en la estructura de

pavimento rígido solo están las capas de sub-base y subrasante por debajo de losa de concreto hidráulico.

En cada uno de los tipos de pavimentos, las distintas capas tienen una función primordial de disipación y transferencia de carga. Es por ello que existen parámetros que rigen la composición de los diferentes materiales que se utilizarán para cada una de ellas. En Guatemala, por ejemplo, el libro azul de caminos determina esos parámetros.

2.1.1.1. Capa de subrasante

La subrasante es la capa de una carretera que soporta la estructura de pavimento, que se extiende a una profundidad en la cual no le sea afectada la carga de diseño, correspondiente al tránsito previsto para el periodo de vida útil de la carretera.

Por lo general, el suelo que se utiliza para la subrasante, se encuentra en el lugar; pero en raras ocasiones ese suelo se sustituye debido a la mala calidad del existente en el lugar. Cuando se reacondiciona el suelo existente, se lleva a cabo una operación de escarificación, homogenización, mezcla, uniformización, conformación y compactación de la subrasante. Los materiales que se consideran inadecuados para una subrasante, son los clasificados A-8 conforme la clasificación de la AASHTO, que son los suelos orgánicos y que son altamente compresibles, los cuales tienen una resistencia muy baja para soportar cargas.

2.1.1.2. Capa de sub-base

Esta es la capa estructural del pavimento que está destinada a soportar, disipar y transmitir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores a esta, y transmitir las a la subrasante, de tal modo que esta las puede resistir. El espesor de la capa de sub-base ya compactada, puede tener un espesor variable, pero en ningún caso puede tener un espesor menor de 10 cm o mayor de 30 cm.

Cuando el cálculo de una capa de sub-base da como resultado un espesor mayor de 30 cm, esta se debe compactar en dos capas, pero nunca una de estas puede tener un espesor menor a 10 cm.

Las especificaciones para los materiales de sub-base varían de acuerdo al tipo de esta misma, debido a que existen tres tipos diferentes de sub-base las cuales son:

- Sub-base común
- Sub-base granular
- Sub-base de grava o piedra triturada

Tomando en cuenta que para cada una de las diferentes tipos de sub-bases, existen variantes en las especificaciones, es necesario conocer el tipo de material con el que dispones para trabajar, y así, se deberá aplicar los ensayos correspondientes con sus respectivas especificaciones de acuerdo con el tipo de sub-base.

2.1.1.3. Capa de base

Esta es la capa estructural del pavimento que se encuentra por debajo de la carpeta de rodadura y está destinada a soportar, disipar y transmitir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito, y transmitir las a la sub-base, de tal modo que la subrasante pueda resistir dichos efectos. El espesor de la capa de base ya compactada, puede tener un espesor variable, pero en ningún caso puede tener un espesor menor de 10 cm o mayor de 30 cm.

Cuando el cálculo de una capa de base da como resultado un espesor mayor de 30 cm, esta se debe compactar en dos capas, pero nunca una de estas puede tener un espesor menor a 10 cm.

Las especificaciones para los materiales de base varían de acuerdo al tipo de base que se esté trabajando, debido a que existen dos tipos diferentes de base:

- Base granular
- Base de grava o piedra triturada

Tomando en cuenta que para cada una de las diferentes tipos de bases, existen variantes en las especificaciones, al igual que en las sub-bases, es necesario conocer el tipo de material con el que se dispone para trabajar, y así, aplicar los ensayos correspondientes con sus respectivas especificaciones de acuerdo con el tipo de base.

2.1.2. Tráfico

Uno de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de una estructura de pavimento es el tráfico, para el cual es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado, donde para este efecto se llevan a cabo estudios del volumen de tránsito, el cual se realiza en lugares específicos tales como: puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

La estructura se diseña en función del daño que produce un eje de 18 000 libras con un número determinado de repeticiones durante toda la vida útil del pavimento. Dado que el tránsito está compuesto por vehículos de diferentes ejes así como su carga respectiva, es necesario hacer una equivalencia de ejes de carga para convertirlos en ejes de 18 000 libras y a las repeticiones que estas equivale, tomando en cuenta el incremento anual del tránsito, el número de años de la vida del diseño, la distribución por dirección en cada sentido del camino y si este fuera de más de un carril, también la distribución vehicular en cada uno de ellos. Esta conversión de uniformización de cargas, se hace a través de los Factores Equivalentes de Carga LEF (Load Equivalent Factors), en un proceso llamado equivalencia de ejes simples de 18 kips.

2.1.2.1. Carga equivalente de ejes simples

Este proceso se conoce como, conversión de ESAL's (Equivalent Single Axle Loads), es decir, Carga Equivalente de Ejes Simples, desarrollado por la Road Test de la AASHTO.

Tomando en cuenta que dependiendo del tipo de pavimento, estos responden de manera diferente a las cargas y por lo tanto esto influye directamente en los Factores Equivalentes de Cargas a utilizarse, es por ello que existen diferentes LEF's para cada tipo de pavimento.

Para aplicar dichos factores, es necesario, primero, asumir un índice de serviciabilidad aceptable hasta el final de la vida útil del diseño, así como también es necesario asumir un espesor de losa en el caso de los pavimentos rígidos y un número estructural SN en el caso de los pavimentos flexibles.

Los valores de índice de serviciabilidad inicial y final recomendados son los siguientes.

$P_o = 4,5$ para pavimentos rígidos

$P_o = 4,2$ para pavimentos flexibles

$P_t = 2,5$ o más para caminos muy importantes

$P_t = 2,0$ para caminos de tránsito menor

Donde:

P_o : índice de serviciabilidad inicial

P_t : índice de serviciabilidad final

Las tablas que se encuentran en el apéndice, nos dan los valores de factores equivalentes de carga LEF's para cada tipo de pavimento, dependiendo de este, se asume un valor de número estructural SN, o bien el espesor de las losa D, así como también el número de serviciabilidad final asumido.

También se requiere factores de camión para cada una de las clases de vehículos que circularán por el tramo en estudio, para eso se ha establecido en Centro América pesos límites para cada tipo de vehículo, como muestra la tabla siguiente.

Tabla V. Peso límite de vehículos en Centro América

Límite de peso por eje

| Tipo de Vehículo | Tipo de eje del tractor | | | Tipo de eje del semiremolque | | | Total Toneladas | |
|------------------|-------------------------|-----------------|-------------|------------------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|
| | Eje simple direccional | Eje de tracción | | | Eje de arrastre | | | |
| | | Eje Simple | Doble rueda | Triple rueda | Eje Simple | Doble rueda | | Triple rueda |
| C2 | 5.00 | 10.00 | | | | | 15.00 | |
| C3 | 5.00 | | 16.50 | | | | 21.50 | |
| C4 | 5.00 | | | 20.00 | | | 25.00 | |
| T2-S1 | 5.00 | 9.00 | | | 9.00 | | 23.00 | |
| T2-S2 | 5.00 | 9.00 | | | | 16.00 | 30.00 | |
| T2-S3 | 5.00 | 9.00 | | | | 20.00 | 34.00 | |
| T3-S1 | 5.00 | | 16.00 | | 9.00 | | 30.00 | |
| T3-S2 | 5.00 | | 16.00 | | | 16.00 | 37.00 | |
| T3-S3 | 5.00 | | 16.00 | | | 20.00 | 41.00 | |
| Otros | --- | --- | --- | --- | --- | --- | Variable | |

Fuente: Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, SIECA, 2000. Resolución 02-01 COMITRAN XXIII.

En Guatemala, se tiene el Acuerdo Gubernativo Número 1084-92, del ministerio de comunicaciones, transporte y obras públicas, que describe los tipos de vehículos así como sus pesos, dimensiones y combinaciones límites para los diferentes tipos de estos que deben de circular por las carretera.

En las tablas VI y VII se indicarán los diferentes valores de pesos en kg que rigen para la circulación de vehículos en nuestro país y con los cuales debemos de trabajar para calcular los factores de camión.

Tabla VI. Pesos por eje para vehículos tipo C2 y C3

| Vehículos tipo C2 y C3 | Peso (kg) | Peso para otros vehículos (kg) |
|----------------------------|-----------|--------------------------------|
| Eje simple | 5 500 | 5 000 |
| Eje simple rueda doble | 10 000 | 9 000 |
| Eje doble (Tándem) tipo A | 16 500 | 16 000 |
| Eje doble (Tándem) tipo B | 12 000 | 12 000 |
| Eje triple (Tridem) tipo A | 20 000 | ----- |
| Eje triple (Tridem) tipo B | 17 000 | ----- |

Fuente: Acuerdo Gubernativo Número 1084-92, del ministerio de comunicaciones, transporte y obras públicas de Guatemala.

Se permitirá una variación hasta del 8% del peso por eje indicado en los tipos de vehículos C2 y C3 y el 5% para los otros tipos de vehículos, siempre que el peso bruto vehicular no exceda del peso máximo autorizado en dicho reglamento.

Tabla VII. Pesos totales autorizados para todas las combinaciones

| Tipo | Descripción | Separación mínima Entre ejes (m) | Peso total Autorizado (kg.) |
|-------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| C-2 | | ----- | 15 500 |
| C-3 | | 5,00 | 22 000 |
| C-3 | Rueda de doble ancho | 5,00 | 26 000 |
| C-4 | | 5,00 | 25 000 |
| T2-S1 | | 6,67 | 23 000 |
| T2-S2 | | 10,50 | 30 000 |
| T2-S3 | | 10,50 | 34 000 |
| T3-S1 | | 10,50 | 30 000 |
| T3-S2 | | 14,40 | 37 000 |
| T3-S3 | | 14,40 | 41 000 |
| C2-R2 | Remol. c/rueda sencilla | 12,38 | 25 000 |

| | | | |
|----------|---------------------------------------|-------|--------|
| C2-R2 | Remol. c/rueda sencilla y rueda doble | 12,38 | 27 500 |
| C2-R2 | Remol. c/rueda doble | 12,38 | 29 500 |
| C3-R2 | Remol. c/rueda sencilla | 14,40 | 32 000 |
| C3-R2 | Remol. c/rueda sencilla y rueda doble | 14,40 | 34 000 |
| C3-R2 | Remol. c/rueda doble | 14,40 | 36 000 |
| C3-R3 | Remol. c/rueda sencilla | 14,40 | 37 000 |
| C3-R3 | Remol. c/rueda sencilla y rueda doble | 16,00 | 39 000 |
| T2-S1-R2 | Remol. c/rueda sencilla | 16,00 | 32 000 |
| T2-S1-R2 | Remol. c/rueda sencilla y rueda doble | 16,00 | 35 500 |
| T2-S1-R2 | Remol. c/rueda doble | 16,00 | 38 000 |
| T3-S1-R2 | Remol. c/rueda sencilla | 16,00 | 40 000 |
| T3-S1-R2 | Remol. c/rueda sencilla y rueda doble | 16,00 | 42 500 |
| T3-S1-R2 | Remol. c/rueda doble | 16,00 | 45 000 |
| T3-S1-R4 | Remol. c/ejes tándem | 16,00 | 50 000 |
| T3-S2-R2 | Remol. c/rueda sencilla | 16,00 | 47 000 |
| T3-S2-R2 | Remol. c/rueda sencilla y rueda doble | 16,00 | 49 500 |
| T3-S2-R2 | Remol. c/rueda doble | 16,00 | 52 000 |
| T3-S2-R4 | Remol. c/ejes tándem | 16,00 | 57 000 |

Fuente: Acuerdo Gubernativo Número 1084-92, del ministerio de comunicaciones, transporte y obras públicas de Guatemala.

Las definiciones para las abreviaturas anteriores serian las siguientes:

C-2: Es un camión o autobús, consiste en un automotor con eje simple (eje direccional) y un eje de rueda doble (eje de tracción).

C-3: Es un camión o autobús, consistente en un automotor con eje simple (eje direccional) y un eje doble o tándem (eje de tracción).

C-4: Es un camión o autobús, consistente en un automotor con eje simple (eje direccional) y un eje triple (eje de tracción).

T-2: Es un tractor o cabezal con un eje simple (eje direccional) y un eje simple de rueda doble (eje de tracción).

T-3: Es un tractor o cabezal con eje simple (eje direccional) y un eje doble o tándem (eje de tracción).

S-1: Es un semi-remolque con un eje trasero simple de rueda doble.

S-2: Es un semi-remolque con un eje trasero doble (tándem).

S-3: Es un semi-remolque con un eje trasero triple (Tridem).

R-2: Es un remolque con un eje delantero simple o de rueda doble y un eje trasero simple o de rueda doble.

R-3: Es un remolque con un eje delantero simple o de rueda doble y un eje trasero doble (tándem).

R-4: Es un remolque con dos ejes de rueda doble o tándem en cada uno de sus extremos.

Después se tomará en cuenta el crecimiento vehicular como el porcentaje de la tasa anual de estos, previamente determinado en estudios de conteo de tráfico. El porcentaje de crecimiento anual puede variar para cada uno de los diferentes tipos de vehículos. Todo esto va de la mano del periodo de diseño de la estructura de pavimento.

En la tabla VIII se tienen los factores de crecimiento de tráfico con respecto al periodo de análisis en años.

Tabla VIII. Factor de crecimiento de tráfico

Factores de crecimiento de tránsito

| Período de análisis (años) | Factor sin Crecimiento | Tasa de crecimiento anual: (g) (en %) | | | | | | |
|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | 2.0 | 2.02 | 2.04 | 2.05 | 2.06 | 2.07 | 2.08 | 2.10 |
| 3 | 3.0 | 3.06 | 3.12 | 3.15 | 3.18 | 3.21 | 3.25 | 3.31 |
| 4 | 4.0 | 4.12 | 4.25 | 4.31 | 4.37 | 4.44 | 4.51 | 4.64 |
| 5 | 5.0 | 5.20 | 5.42 | 5.53 | 5.64 | 5.75 | 5.87 | 6.11 |
| 6 | 6.0 | 6.31 | 6.63 | 6.80 | 6.98 | 7.15 | 7.34 | 7.72 |
| 7 | 7.0 | 7.43 | 7.90 | 8.14 | 8.39 | 8.65 | 8.92 | 9.49 |
| 8 | 8.0 | 8.58 | 9.21 | 9.55 | 9.90 | 10.26 | 10.64 | 11.44 |
| 9 | 9.0 | 9.75 | 10.58 | 11.03 | 11.49 | 11.98 | 12.49 | 13.58 |
| 10 | 10.0 | 10.95 | 12.01 | 12.58 | 13.18 | 13.82 | 14.49 | 15.94 |
| 11 | 11.0 | 12.17 | 13.49 | 14.21 | 14.97 | 15.78 | 16.65 | 18.53 |
| 12 | 12.0 | 13.41 | 15.03 | 15.92 | 16.87 | 17.89 | 18.98 | 21.38 |
| 13 | 13.0 | 14.68 | 16.63 | 17.71 | 18.88 | 20.14 | 21.50 | 24.52 |
| 14 | 14.0 | 15.97 | 18.29 | 19.16 | 21.01 | 22.55 | 24.21 | 27.97 |
| 15 | 15.0 | 17.29 | 20.02 | 21.58 | 23.28 | 25.13 | 27.15 | 31.77 |
| 16 | 16.0 | 18.64 | 21.82 | 23.66 | 25.67 | 27.89 | 30.32 | 35.95 |
| 17 | 17.0 | 20.01 | 23.70 | 25.84 | 28.21 | 30.84 | 33.75 | 40.55 |
| 18 | 18.0 | 21.41 | 25.65 | 28.13 | 30.91 | 34.00 | 37.45 | 45.60 |
| 19 | 19.0 | 22.84 | 27.67 | 30.54 | 33.76 | 37.38 | 41.45 | 51.16 |
| 20 | 20.0 | 24.30 | 29.78 | 33.06 | 36.79 | 41.00 | 45.76 | 57.28 |
| 25 | 25.0 | 32.03 | 41.65 | 47.73 | 54.86 | 63.25 | 73.11 | 98.35 |
| 30 | 30.0 | 40.57 | 56.08 | 66.44 | 79.06 | 94.46 | 113.28 | 164.49 |
| 35 | 35.0 | 49.99 | 73.65 | 90.32 | 111.43 | 138.24 | 172.32 | 271.02 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

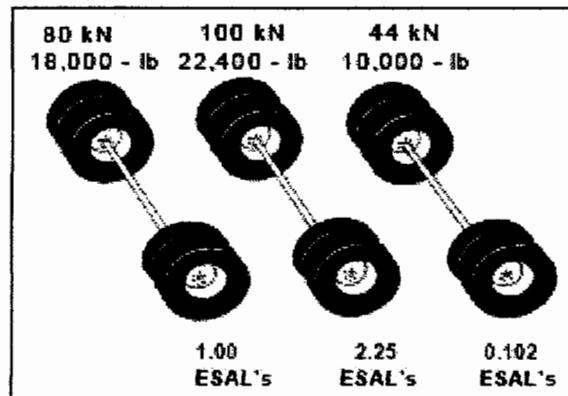
Tabla D-20.

En la siguiente gráfica se muestra como se debe hacer una equivalencia para encontrar el factor de carga, de acuerdo al tipo de eje que se tenga con relación a un eje de 18 000 libras (80 kN) con respecto al tipo de vehículo, y así poder obtener el factor de camión correspondiente.

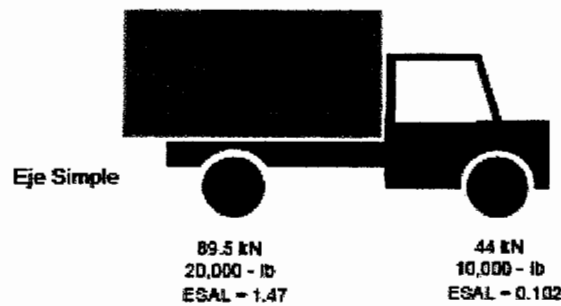
Figura 9. Cálculo de los factores equivalentes de carga por vehículo

Factores de equivalencia de la carga

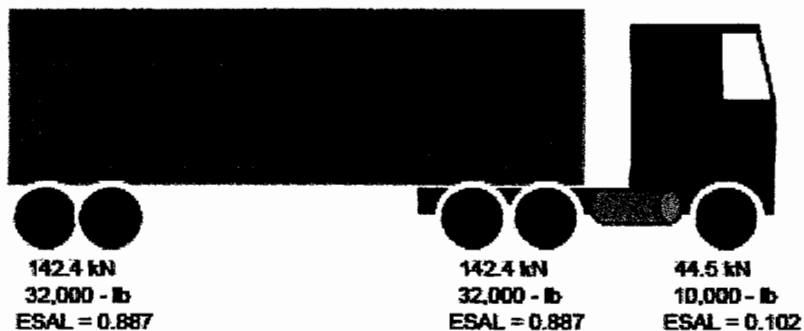
SN = 4, Índice de Serviciabilidad final = 2.5



Ejes simples



Eje Tandem



Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.
Página 66.

Seguidamente para determinar los ESAL's, se deberá hacer uso de una hoja de trabajo como la que se muestra a continuación.

Figura 10. Hoja de trabajo para calcular el ESAL's de diseño

Ejemplo para calcular el equivalente de 18 Kips en carga de ejes simples

Proyecto _____ Período de diseño 15
 No. De prueba _____ SN o D 4
 Índice de serviciabilidad final = P_1 2.5

| Tipo de Vehículo | Cantidad de Vehículos diarios "A" | Factor de crecimiento "B" | Tránsito de diseño "C" | ESAL's Factor "D" | ESAL's de diseño "E" |
|--|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|
| Vehículos sencillos | | 4% | | | |
| Autos | 500 | 20.02 | 3,653,650 | 0.0002 | 731 |
| Autobuses | 125 | 20.02 | 913,413 | 1.1005 | 1,005,210 |
| Camiones eje simple | | 2% | | | |
| Pick-ups | 250 | 17.29 | 1,577,713 | 0.0004 | 631 |
| Otros Vehículos 2 ejes y cuatro ruedas (agrícolas) | 25 | 17.29 | 157,771 | 0.0132 | 2,083 |
| Camiones de 2 ejes, 6 ruedas, camiones de 3 ejes o más | 80 | 17.29 | 504,868 | 1.972 | 995,599.7 |
| Camiones tipo trailer eje compuesto | | 6% | | | |
| Semiremolque (3 ejes) | 450 | 21.58 | 3,544,515 | 1.8760 | 6,649,510 |
| Semiremolque (4 ejes) | 45 | 21.58 | 354,452 | 2.7630 | 979,349 |
| Semiremolque (5 o más ejes) | 25 | 21.58 | 196,918 | 3.6500 | 718,749 |
| | | 2% | | | |
| Camión acoplado (5 ejes) | 10 | 17.29 | 63,109 | 3.6500 | 230,346 |
| Camión acoplado (6 o más ejes) | 5 | 17.29 | 31,554 | 4.5370 | 143,162 |
| TOTAL VEHICULOS | 1,515 | | ESAL's de diseño | | 10,725,371 |

Factor de Dirección: $0.5^{(7)}$
 Factor de Carril: $0.9^{(8)}$
 ESAL's por carril de tránsito: $0.5 \times 0.9 \times 10,725,371 = 4,826,417$

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.

Página 67.

En la hoja de trabajo anterior se puede observar como en la columna "A", se debe colocar la cantidad de vehículos de cada categoría que pasan por el lugar en estudio correspondiente al conteo de tráfico.

En la columna "B" se debe colocar el factor de crecimiento para cada tipo de vehículo de acuerdo a la tasa de crecimiento anual y el periodo de vida útil en años del diseño asumido.

En la columna "C" se coloca el producto de la multiplicación del factor de crecimiento y el número de vehículos en las columnas "A" y "B" con el número de días que tiene un año (365 días).

Y en la columna "D" se debe colocar el factor de ESAL que corresponda a cada tipo de vehículo, de acuerdo al espesor de losa o número estructural, según sea el caso que se haya considerado con su respectivo índice de serviciabilidad final asumido, los cuales se encuentran en las tablas de la D-1 hasta la D-18.

Y por último, en la columna "E" se colocará el producto de multiplicar el tránsito de diseño con sus respectivos factores de ESAL's de las columnas "C" y "D". Y la suma de todos los valores en la columna "E" será el ESAL's de diseño.

Teniendo el valor de la sumatoria de la columna "E", este valor se debe multiplicar por los factores de distribución por dirección y carril, para determinar el ESAL's del carril de tránsito con el que debemos diseñar la estructura de pavimento.

2.1.2.2. Factor de distribución por dirección

Este factor se utiliza debido a que en todo flujo vehicular censado, la mayoría de veces se divide 50% de ida y 50% de regreso, por cual, casi siempre se utiliza un valor de 0,5 para el factor de distribución por dirección. Rara vez puede darse el caso en que la mayor parte de un flujo vehicular sea mayor en una sola dirección. Es por esta razón la importancia de los datos al momento de realizar el censo vehicular.

En la siguiente tabla se muestran algunos factores de distribución por dirección dependiendo del número de carriles en ambas direcciones.

Tabla IX. Factores de distribución por dirección

| Número de carriles en ambas direcciones | Factor de distribución por dirección LD |
|---|--|
| 2 | 50% |
| 4 | 45% |
| 6 o más | 40% |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

2.1.2.3. Factor de distribución por carril

Este otro factor se debe a que cuando existe más de un carril en una sola dirección, uno de estos recibe la mayor parte de los vehículos que transitan por la zona. Para caminos de dos o más carriles, el carril de diseño será el externo, debido a que los vehículos pesados transitan casi siempre en ese carril.

El factor de distribución por carril depende directamente del número de carriles en una sola dirección, como muestra la tabla siguiente.

Tabla X. Factores de distribución por carril

| Número de carriles en una sola dirección | Factor de distribución por carril LC |
|--|---|
| 1 | 1,00 |
| 2 | 0,80 – 1,00 |
| 3 | 0,60 – 0,80 |
| 4 | 0,50 – 0,75 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

2.1.3. Suelos de subrasante

Por lo general, los suelos para subrasante, son suelos cohesivos que no tienen una gran resistencia al corte, pero tiene propiedades resilientes muy bien definidas.

Para el diseño de una estructura de pavimento se utiliza el módulo de resiliencia M_r y el módulo de reacción k de la subrasante, dependiendo del tipo de pavimento que se vaya a diseñar, es decir, para una estructura de pavimento flexible se usará el M_r y para una estructura de pavimento rígido se usará K , los cuales son determinados mediante varios tipos de ensayos.

En este trabajo se hará referencia a dos tipos de ensayos como lo son, el ensayo de C.B.R. y el ensayo de compresión triaxial. El módulo de reacción K lo encontraremos mediante ensayos de C.B.R. y el módulo de resiliencia mediante ensayos de C.B.R. y ensayos de compresión triaxial.

2.1.3.1. Modulo de reacción K

En el diseño de estructuras de pavimento rígido, la resistencia de la subrasante es considerada dentro del método por medio del módulo de reacción del suelo K, el cual, es la relación que existe entre una presión determinada en un suelo con su respectiva deformación.

$$K = p / \Delta$$

Donde:

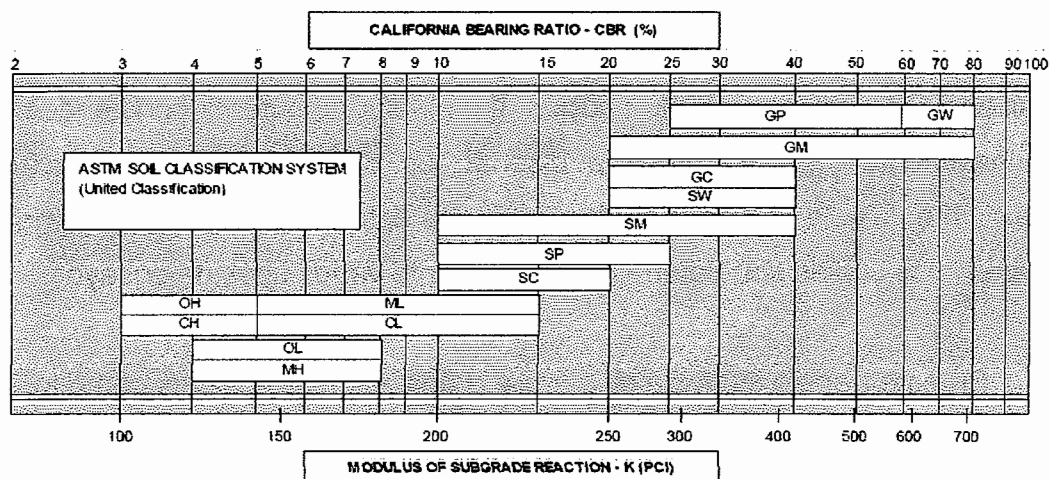
K: Módulo de reacción (lbs/plg³)

P: Presión sobre el suelo (lbs/plg²)

Δ: Deformación en pulgadas.

Los valores de k, han sido correlacionados con los ensayos de C.B.R. como lo muestra la siguiente gráfica.

Figura 11. Relación de K con el C.B.R.



Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 23.

De acuerdo con el porcentaje de C.B.R. obtenido en el ensayo podemos determinar el valor de k, el cual posteriormente se debe corregir para poder introducirla en la fórmula para determinar el espesor de capa de concreto.

Para poder obtener el valor de k corregido se puede utilizar una relación que la AASHTO ha desarrollado con el módulo de resiliencia, o bien, por medio de la figura 44, capítulo 4. La relación para determinar el Kc es la siguiente.

$$Kc = Mr / 19,4$$

Donde:

Kc: módulo de reacción corregido (pci)

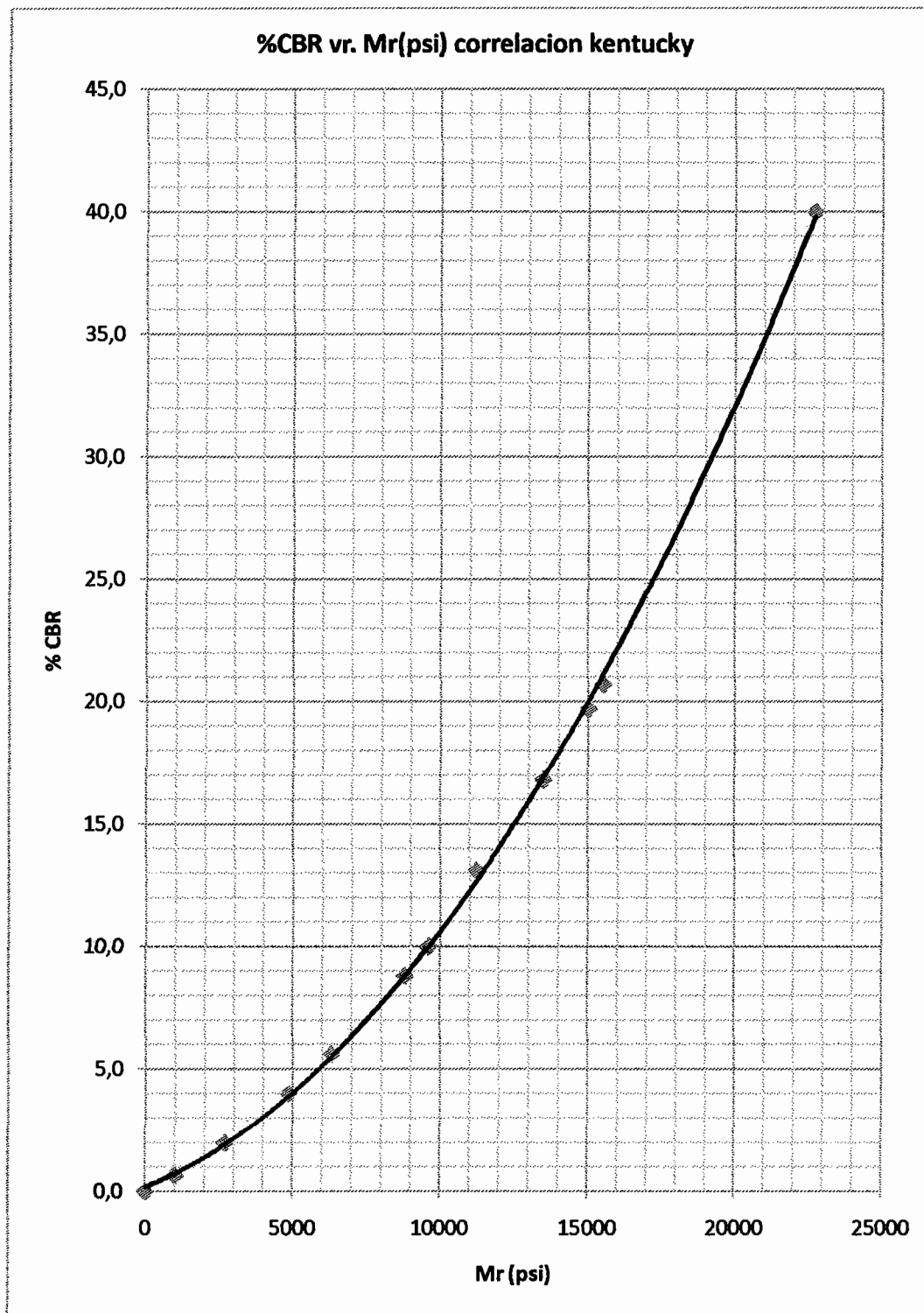
Mr: módulo de resiliencia (psi)

2.1.3.2. Módulo de resiliencia Mr

En el diseño de estructuras de pavimento flexible, la resistencia de la subrasante es considerada dentro del método por medio del módulo resiliente de la subrasante Mr. Este valor se puede encontrar en correlaciones con valores obtenidos en el ensayo de C.B.R. o bien con el ensayo de triaxial cíclico, el cual es más exacto, pero mucho más complicado debido al tipo de equipo a utilizar.

Con el ensayo de C.B.R. se puede obtener mediante la siguiente gráfica basada en la correlación Kentucky entre C.B.R. – Mr.

Figura 12. Relación del Mr. con el C.B.R.



Para obtener el módulo de resiliencia mediante el ensayo de triaxial cíclico, se debe utilizar la siguiente relación.

$$M_r = \sigma_d / \epsilon_r$$

Donde:

M_r : Módulo de resiliencia

σ_d : Esfuerzo desviador

ϵ_r : Deformación unitaria remanente

2.1.4. Materiales de construcción

En Guatemala se utilizan por lo regular materiales explotados directamente de los proyectos o en bancos de préstamo. En la mayoría de los casos, se colocan plantas trituradoras para tener el debido control del material y en otros casos se adquiere material de canteras de extracción de material definidas por zonas geológicas establecidas.

El control del material para sus diferentes usos, debe cumplir con los parámetros establecidos, en el caso de Guatemala, en el libro azul de caminos, para que estos puedan cumplir con los valores mínimos para las ecuaciones de diseño de las estructuras de pavimento. Los materiales que se analizarán, serán los utilizados en las mezclas de concreto hidráulico, así como concreto asfáltico y los materiales para capas de base, sub-base y subrasante.

2.1.4.1. Materiales para subrasante

El material que se utilizará para subrasante, como ya se mencionó con anterioridad debe de ser un suelo con características cohesivas, pero siempre y cuando no exceda los límites de plasticidad con el que deje de considerarse un material apto para utilizarlo como tal. Para una capa de subrasante se deben efectuar cortes y rellenos no mayores de 0,20 m y se deben de retirar las rocas mayores de 0,10 m.

La capa de subrasante debe ser compactada como mínimo a un 95% de la densidad máxima del proctor modificado, y con un contenido de humedad de $\pm 3\%$ de la humedad óptima, pero en el caso de una subrasante muy arcillosa con un límite líquido superior al 45% y un índice de plasticidad mayor al 15%, se podrá compactar como mínimo a un 90% de la densidad máxima del proctor modificado, y por lo menos con un 3% de contenido de humedad mayor que la humedad óptima, siempre y cuando no exceda en un más del 4% al valor de su límite plástico.

Se deben realizar chequeos de compactación por cada 400 m² o fracción de subrasante reacondicionada el cual no exceda los 20 m en longitud, para los cuales existe una tolerancia en menos del 2%, respecto al porcentaje de compactación especificado anteriormente. Para esta capa se deben realizar los siguientes ensayos.

- Ensayo de proctor
- Ensayo de C.B.R.
- Ensayo de granulometría
- Ensayo de límites de Atterberg
- Ensayos de densidad de campo

2.1.4.2. Materiales para base y sub-base

Los diferentes tipos de materiales para bases y sub-bases están sujetos a varios tipos de ensayos para determinar la calidad de cada uno de ellos cumpliendo con ciertos parámetros de calidad para su aprobación y uso en la construcción.

Las siguientes tablas muestran las diferentes especificaciones para cada uno de los ensayo de acuerdo al tipo de base y sub-base.

Tabla XI. Especificaciones para sub-bases de acuerdo al libro azul de caminos, 2001

| | SUB-BASE COMUN | SUB-BASE GRANULAR | SUB-BASE TRITURADA |
|-----------------------------|---|--|---|
| DESCRIPCIÓN | Material de tipo granular en su estado natural o mezclados. | Combinación de piedra o grava con arena y suelo, clasificados o con trituración parcial. | Combinación de piedra o grava triturada con material de relleno. |
| ESPESOR | capa entre 10 y 30 cm. | capa entre 10 y 30 cm. | capa entre 10 y 30 cm. |
| C.B.R. | ≥ 30% a 95% de compactación | ≥ 40% a 95% de compactación y menos de 0,5% de hinchamiento | ≥ 50% a 95% de compactación y menos de 0,5% de hinchamiento |
| GRANULOMETRÍA | Rocas ≤ 7 cm y no ≥ 1/2 espesor de capa, pasa # 40 ≤ 50% y pasa # 200 ≤ 25% | Ver tabla granulométrica para sub-base y base granular, y pasa # 200 < 1/2 pasa # 40 | Ver tabla granulométrica para sub-base y base triturada, y pasa # 200 < 1/2 pasa # 40 |
| LÍMITES DE ATTERBERG | LL ≤ 25 ; IP ≤ 6 a excepción en disposiciones IP ≤ 8 por vía húmeda | LL ≤ 25 ; IP ≤ 6 por vía húmeda | LL ≤ 25 ; IP ≤ 6 por vía húmeda |
| EQUIVALENTE DE ARENA | EA ≥ 25% | EA ≥ 30% | EA ≥ 40% |

| | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|
| ABRASIÓN | sin ensayo | ≤ 50% | ≤ 50% |
| PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS | sin ensayo | ≤ 25% | ≤ 20% |
| CARAS FRACTURADAS | sin ensayo | sin ensayo | ≥ 50% |
| COMPACTACIÓN | 100% tolerancia -3% a cada 400 m ² ó 20 m lineales | 100% tolerancia -3% a cada 400 m ² ó 20 m lineales | 100% tolerancia -3% a cada 400 m ² ó 20 m lineales |
| DEFLEXIÓN | deflexión ≤ 2 mm. distancia ≤ 3,68 m a cada 400 m ² | deflexión ≤ 2 mm. distancia ≤ 3,68 m a cada 400 m ² | deflexión ≤ 2 mm. distancia ≤ 3,68 m a cada 400 m ² |

Tabla XII. Especificaciones para bases de acuerdo al libro azul de caminos, 2001

| | BASE GRANULAR | BASE TRITURADA |
|-----------------------------|--|---|
| DESCRIPCIÓN | Combinación de piedra o grava con arena y suelo, clasificados o con trituración parcial. | Combinación de piedra o grava triturada con material de relleno. |
| ESPESOR | capa entre 10 y 30 cm. | capa entre 10 y 30 cm. |
| C.B.R. | ≥ 70% a 95% de compactación y menos de 0,5% de hinchamiento | ≥ 90% a 95% de compactación y menos de 0,5% de hinchamiento |
| GRANULOMETRÍA | Ver tabla granulométrica para sub-base y base granular, y pasa # 200 < 1/2 pasa # 40 | Ver tabla granulométrica para sub-base y base triturada, y pasa # 200 < 1/2 pasa # 40 |
| LÍMITES DE ATTERBERG | LL ≤ 25 ; IP ≤ 6 por vía húmeda | LL ≤ 25 ; IP ≤ 3 por vía húmeda a excepción en disposiciones IP ≤ 6 |
| EQUIVALENTE DE ARENA | EA ≥ 30% | EA ≥ 40% |
| ABRASIÓN | ≤ 50% | ≤ 50% |

| | | |
|--|---|---|
| PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS | ≤ 25% | ≤ 20% |
| CARAS FRACTURADAS | sin ensayo | ≥ 50% |
| COMPACTACIÓN | 100% tolerancia -3% a cada 400 m ² ó 20 m lineales | 100% tolerancia -3% a cada 400 m ² ó 20 m lineales |
| DEFLEXIÓN | Deflexión ≤ 1,5 mm. distancia ≤ 3,68 m a cada 400 m ² | Deflexión ≤ 1,5 mm. distancia ≤ 3,68 m a cada 400 m ² |

Los ensayos anteriormente descritos, algunos de ellos se deben realizar a las muestras alteradas en el laboratorio, y otros ensayos son de campo, los cuales se deben realizar a las capas ya compactadas para controlar dicha compactación.

Para el caso de las granulometrías de bases y sub-bases granular y triturada, ver las tablas siguientes de especificaciones de los límites para cada uno de los tamices correspondientes.

Tabla XIII. Tipos de graduación para material de sub-base o base granular

| Standard d mm | Tamiz N° | Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27) | | | | | |
|------------------|-------------|---|--|------------|---|------------|---|
| | | TIPO "A" (Sub-base) 50 mm (2") máximo | TIPO "A" (Base) 50 mm (2") máximo | | TIPO "B" (Sub-base y Base) 38.1 mm (1 ½") máximo | | TIPO "C" (Sub-base y Base) 25 mm (1") máximo |
| | | <u>A-1</u> | <u>A-1</u> | <u>A-2</u> | <u>B-1</u> | <u>B-2</u> | <u>C-1</u> |
| 50.0 | 2" | 100 | 100 | 100 | | | |
| 38.1 | 1 ½" | - | - | - | 100 | 100 | |
| 25.0 | 1" | 60-90 | 65- 90 | 60- 85 | - | - | 100 |
| 19.0 | ¾" | - | - | - | 60-90 | - | - |
| 9.5 | ⅜" | - | - | - | - | - | 50-85 |
| 4.75 | N° 4 | 20-60 | 25- 60 | 20- 50 | 30-60 | 20-50 | 35-65 |
| 2.00 | N° 10 | - | - | - | - | - | 25-50 |
| 0.425 | N° 40 | - | - | - | - | - | 12-30 |
| 0.075 | N° 200 | 3-12 | 3-12 | 3-10 | 5-15 | 3-10 | 5-15 |

Fuente: Libro Azul de Caminos, 2001, tabla 304-1.

Tabla XIV. Tipos de graduación para material de sub-base y base triturada

| Estándar mm | Tamiz N° | Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27) | | |
|----------------|-------------|---|--------------------------------------|----------------------------------|
| | | TIPO "A" 50 mm (2") Máximo | TIPO "B" 38.1 mm (1 ½") máximo | TIPO "C" 25 mm (1") máximo |
| 50.0 | 2" | 100 | | |
| 38.1 | 1 ½" | - | 100 | |
| 25.0 | 1" | 65-90 | 70-100 | 100 |
| 19.0 | ¾" | - | 60-90 | 70-100 |
| 9.5 | ⅜" | - | 45-75 | - |
| 4.75 | N° 4 | 25-60 | 30-60 | 35-65 |
| 2.00 | N° 10 | - | 20-50 | - |
| 0.425 | N° 40 | 10-30 | 10-30 | 12-30 |
| 0.075 | N° 200 | 3-12 | 5-15 | 5-15 |

Fuente: Libro Azul de Caminos, 2001, tabla 305-1.

2.1.4.3. Materiales para concreto asfáltico

El material que se ocupará para la elaboración de una mezcla asfáltica, debe ser piedra o grava triturada en combinación con arena de río y/o polvo mineral de trituración obtenidos en canteras con plantas trituradoras, esto para poder formar un material clasificado que cumpla con las especificaciones mínimas para agregados de mezclas asfálticas.

Los diferentes tipos de agregados deben estar libre de materia vegetal, basura, terrones de arcilla o sustancias que puedan causar fallas en el pavimento. La siguiente tabla muestra las especificaciones mínimas para los agregados de mezclas asfálticas.

Tabla XV. Especificaciones para materiales de mezclas asfálticas de acuerdo con el libro azul de caminos, 2001

| | Agregado grueso Retenido en el tamiz # 4 | Agregado fino Pasa tamiz # 4 |
|--|--|---|
| Abrasión | 35% máximo | — |
| Desintegración al Sulfato de sodio | 12% máximo | — |
| Caras fracturadas | 1 cara fracturada 90% mínimo y 2 caras fracturadas 75% mínimo | — |
| Partículas Planas o Alargadas | 8% máximo | — |
| Equivalente de Arena | — | 35% mínimo |
| Índice Plástico | — | 4% máximo |
| Graduación | Ver tabla de graduación para agregados de concreto asfáltico | Ver tabla de graduación para agregados de concreto asfáltico |

Las mezclas de agregados o de agregados con polvo mineral deben cumplir con cualquiera de las graduaciones mostradas en las tablas XVI y XVII, dependiendo del tipo de mezcla que se considere acorde al diseño.

Tabla XVI. Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico

| Tamaño del Tamiz | Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11) | | | | | |
|------------------|---|-------------|-------------|-----------|-------------|------------|
| | Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾ | | | | | |
| | A (50.8 mm) | B (38.1 mm) | C (25.4 mm) | D (19 mm) | E (12.5 mm) | F (9.5 mm) |
| | 2" | 1 ½" | 1" | ¾" | ½" | ⅜" |
| 63.00 mm | 100 | | | | | |
| 50.00 mm | 90-100 | 100 | | | | |
| 38.10 mm | - | 90-100 | 100 | | | |
| 25.00 mm | 60-80 | - | 90-100 | 100 | | |
| 19.00 mm | - | 56-80 | - | 90-100 | 100 | |
| 12.50 mm | 35-65 | - | 56-80 | - | 90-100 | 100 |
| 9.50 mm | - | - | - | 56-80 | - | 90-100 |
| 4.75 mm | 17-47 | 23-53 | 29-59 | 35-65 | 44-74 | 55-85 |
| 2.36 mm | 10-36 | 15-41 | 19-45 | 23-49 | 28-58 | 32-67 |
| 0.30 mm | 3-15 | 4-16 | 5-17 | 5-19 | 5-21 | 7-23 |
| 0.075 mm | 0-5 | 0-6 | 1-7 | 2-8 | 2-10 | 2-10 |

Fuente: Libro Azul de Caminos, 2001, tabla 401-1.

Tabla XVII. Requisitos de graduación para el polvo mineral

| Estándar mm | Tamiz N° | Porcentaje total que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 37) |
|-------------|----------|---|
| 0.600 | 30 | 100 % |
| 0.300 | 50 | 95-100 % |
| 0.075 | 200 | 70-100 % |

Fuente: Libro Azul de Caminos, 2001, tabla 401-2.

2.1.4.4. Materiales para concreto hidráulico

Los materiales que se ocuparán para la elaboración de una mezcla de concreto hidráulico, deben ser piedra o grava triturada o en algunos casos piedra de canto rodado, extraído de ríos, en combinación con arena de río y/o polvo de piedra triturada, obtenidos en canteras con plantas trituradoras, esto

para poder formar un material clasificado que cumpla con las especificaciones para agregados que se utilizarán en mezclas de concreto hidráulico tipo portland.

Los diferentes tipos de agregados, deben estar libre de materia vegetal, basura, terrones de arcilla o sustancias que puedan causar fallas en el pavimento.

Las especificaciones que deben cumplir los materiales para mezclas de concreto hidráulico se describen en la siguiente tabla.

Tabla XVIII. Especificaciones para materiales en mezclas de concreto hidráulico de acuerdo con el libro azul de caminos, 2001

| | Agregado Fino | Agregado Grueso |
|---|-------------------------|---|
| Desintegración al Sulfato de sodio | No mayor de 15% | No mayor de 15% |
| Equivalente de arena | No menor de 75% | ----- |
| Graduación | Ver tabla de graduación | Ver tabla de graduación Pasa No. 200 no mayor de 1,0% salvo Polvo de trituración no mayor de 1,5% |
| Abrasión | ----- | No mayor de 40% |
| Partículas planas y alargadas | ----- | No mayor de 15% |
| Partículas friable y terrones de arcilla | ----- | Partículas no mayor de 5% y Terrones no mayor de 0,25% |

Las graduaciones para agregado grueso y para agregado fino se detallan en las tablas XIX y XX.

Tabla XIX. Graduación para agregado grueso de concreto hidráulico

| | Graduaciones AASHTO M80 | (2 ½") 63.0 mm | (2") 50.0 mm | (1 ½") 38.1 mm | (1") 25.0 mm | (¾") 19.0 mm | (½") 12.5 mm | (⅜") 9.50 Mm | No.4 4.75 mm | No.8 2.36 mm |
|-------|----------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Nº7 | ½" a No.4 | – | – | – | – | 100 | 90-100 | 40-70 | 0-15 | 0-5 |
| Nº67 | ¾" a No.4 | – | – | – | 100 | 90-100 | – | 20-55 | 0-10 | 0-5 |
| Nº57 | 1" a No.4 | – | – | 100 | 95-100 | – | 25-60 | – | 0-10 | 0-5 |
| Nº467 | 1 ½" a No.4 | – | 100 | 95-100 | – | 35-70 | – | 10-30 | 0-5 | – |
| Nº367 | 2" a No.4 | 100 | 95-100 | – | 35-70 | – | 10-30 | – | 0-5 | – |
| Nº4 | 1 ½" a ¾" | – | 100 | 90-100 | 20-35 | 0-15 | – | 0-5 | – | – |
| Nº3 | 2" a 1" | 100 | 90-100 | 35-70 | 0-15 | – | 0-5 | – | – | – |

Fuente: Libro Azul de Caminos, 2001, tabla 551-03.

Tabla XX. Graduación para agregado fino de concreto hidráulico

| TAMICES AASHTO M 92 | | PORCENTAJE EN MASA QUE PASA |
|---------------------|------|-----------------------------|
| 9,500 mm | 3/8" | 100 |
| 4,750 mm | No.4 | 95-100 |
| 2,360 mm | No.8 | 80-100 |
| 1,180 mm | 16 | 50-85 |
| 0,600 mm | 30 | 25-60 |
| 0,300 mm | 50 | 10-30 ⁽¹⁾ |
| 0,150 mm | 100 | 2-10 ⁽¹⁾ |
| 0,075 mm | 200 | 0- 5 ⁽²⁾ |

Fuente: Libro azul de caminos, 2001, tabla 551-02.

El módulo de finura no debe ser menor de 2,3 ni mayor de 3,1, ni variar en más de 0,20 del valor asumido al seleccionar las proporciones del concreto.

2.1.5. Medio ambiente

Tomando en cuenta que Guatemala es un país con un alto índice de lluvias al año, debido a sus regiones montañosas, es muy importante tomar en cuenta los aspectos de humedad y saturación en los suelos sobre los que vamos a construir una carretera, así como, la capacidad de drenaje que estos suelos posean.

De acuerdo con el tipo de material con el que se cuenta para una estructura de pavimento, será muy importante saber la capacidad que tenga para drenar el agua, así como, el tiempo que este estará expuesto a niveles cercanos a la saturación. Todo esto es de vital importancia para poder definir los coeficientes de drenaje que deberán de ir en las ecuaciones de pavimento flexible y pavimento rígido.

También hay que considerar los efectos de la temperatura en el pavimento. En el caso del módulo dinámico de las mezclas asfálticas, las curvas de diseño también se ven afectadas con respecto a los efectos de temperatura sobre el módulo de resiliencia de la subrasante y los materiales granulares de la sub-base y base. Para la subrasante esto se realiza al incrementarse el módulo resiliente de la misma en el periodo de menor temperatura y se reduce cuando se producen mayores temperaturas.

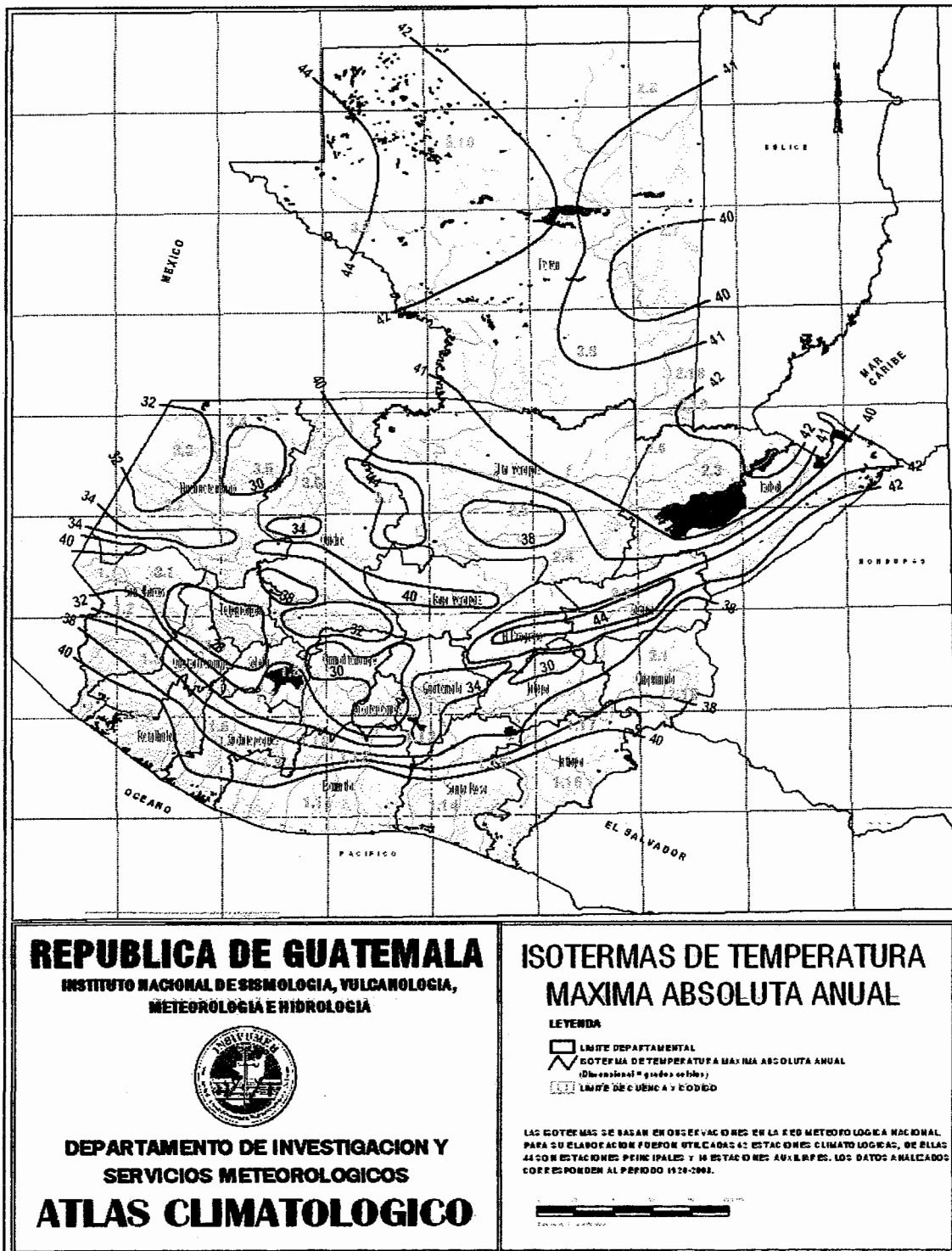
Las figuras 13 y 14, proporcionan información sobre los días que llueve en promedio al año en toda la región de Guatemala, así como, las temperaturas máximas que se pueden llegar a tener en el año a nivel nacional.

Figura 13. Sumatoria de días con lluvia promedio anual



Fuente: INSIVUMEH

Figura 14. Temperaturas máximas al año



Fuente: INSIVUMEH

Es importante conocer las temperaturas que predominan en ciertas zonas de nuestro país, para así poder determinar el tipo de cemento asfáltico que utilizaremos en el diseño de nuestra mezcla para la carpeta de rodadura, tomando en cuenta que se recomiendan diferentes grados de asfalto, dependiendo de la temperatura a la que va estar expuesta el pavimento. Ver tabla XXI.

Tabla XXI. Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima

| Clima | Temperatura media anual Del aire (TMAA) | Grados de Asfalto |
|-----------------|--|--------------------------|
| Frío | Menor o igual a 7° C | AC-5, AC-10 |
| Templado | Entre 7° y 24° C | AC-10, AC-20 |
| Cálido | Mayor de 24° C | AC-20, AC-40 |

Fuente: The Asphalt institute (MS-1), September 1981, página 35.

2.1.5.1. Coeficiente de drenaje

Los métodos de diseño de pavimentos, dependen de la práctica de construir pavimentos fuertes para resistir el efecto combinado de cargas y agua. Es por ello que una buena capacidad de evacuar el agua del pavimento mantiene la capacidad soporte de la subrasante, es decir, se mantiene la propiedad resiliente cuando la humedad es estable.

En el diseño de pavimentos se utilizan los coeficientes de drenaje (m_i) para pavimentos flexibles y (C_d) para pavimentos rígidos, los cuales se ajustan a las ecuaciones de diseño, para cada uno de estos se consideran los siguientes rangos de coeficientes de drenaje. Ver tabla XXII y XXIII.

Tabla XXII. Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles (m_i)

| Calidad del drenaje | P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación | | | |
|---------------------|--|-----------|-----------|-------|
| | < 1% | 1% - 5% | 5% - 25% | > 25% |
| Excelente | 1.40-1.35 | 1.35-1.30 | 1.30-1.20 | 1.20 |
| Bueno | 1.35-1.25 | 1.25-1.15 | 1.15-1.00 | 1.00 |
| Regular | 1.25-1.15 | 1.15-1.05 | 1.00-0.80 | 0.80 |
| Pobre | 1.15-1.05 | 1.05-0.80 | 0.80-0.60 | 0.60 |
| Muy pobre | 1.05-0.95 | 0.95-0.75 | 0.75-0.40 | 0.40 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla XXIII. Coeficientes de drenaje para pavimentos rígidos (C_d)

| Calidad del drenaje | P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación | | | |
|---------------------|--|-----------|-----------|-------|
| | < 1% | 1% - 5% | 5% - 25% | > 25% |
| Excelente | 1.25-1.20 | 1.20-1.15 | 1.15-1.10 | 1.10 |
| Bueno | 1.20-1.15 | 1.15-1.10 | 1.10-1.00 | 1.00 |
| Regular | 1.15-1.10 | 1.10-1.00 | 1.00-0.90 | 0.90 |
| Pobre | 1.10-1.00 | 1.00-0.90 | 0.90-0.80 | 0.80 |
| Muy pobre | 1.00-0.90 | 0.90-0.80 | 0.80-0.70 | 0.70 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

En donde "P" se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = ((S_t + R) / 365) * 100$$

Donde:

P: Porcentaje del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación.

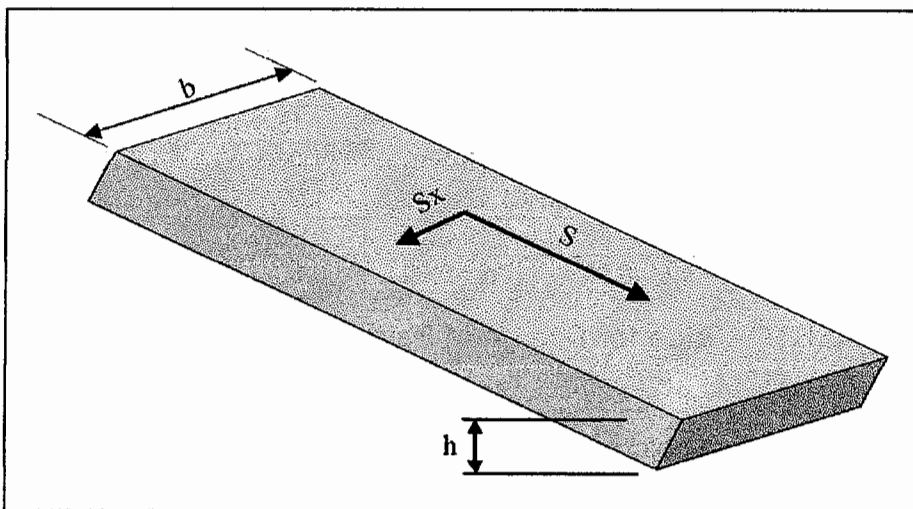
S_t: Días de traslape entre la época lluviosa y seca.

R: Días con lluvia en que el pavimento puede drenar hasta el 85% del estado de saturación en 24 horas o menos.

Para los días de traslape entre la época de lluvia y seca se usará entre 15 a 20 días, y para los días con lluvia al año, se usará el mapa de isocromas media anual, figura 13. Tomando porcentajes menores a 80% del total de los días de lluvia, dependiendo de la zona, tomando en cuenta la temperatura del lugar.

El otro aspecto a resolver sería determinar si nuestro material es excelente o malo para drenar el agua de lluvia en cierto tiempo determinado, para ello se realiza los siguientes cálculos:

Figura 15. Geometría de base o sub-base



Analizar:

- Pendiente longitudinal (S)
- Pendiente transversal (S_x)
- Espesor de la capa a drenar (h)
- Ancho de base o sub-base (b)

Calcular:

- Longitud resultante de la base: $L_r = b * ((S / S_x)^2 + 1)^{1/2}$
- Pendiente transversal resultante: $S_r = (S^2 + S_x^2)^{1/2}$
- Factor de pendiente longitudinal: $S_i = (L_r * S_r) / h$

De los materiales se debe conocer:

- Porcentajes de finos (P_{200})
- Tipo de finos (limos, arcillas o finos inertes con $IP < 1\%$)
- Diámetro efectivo (D_{10})
- Densidad seca (σ_d)
- Índice Plástico (IP)
- Gravedad específica (G_s)

$$G_s = W_s / V_s$$

Donde:

W_s : Peso específico de los sólidos

V_s : Volumen total de los sólidos

Calcular:

- Suponiendo que V_1 (Volumen total) = 1 (asumido)
- $V_s = W_s / G_s$
- V_v (Volumen de vacíos) = $V_1 - V_s = N_{emax}$ (Volumen de agua que llena completamente los vacíos del material)
- Seleccionar la pérdida de agua (C).

Tabla XXIV. Cantidad de agua que puede drenar por gravedad "C"

| Material predominante | Cantidad de finos | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|------|---------|---------------|------|---------|---------------|------|---------|
| | < 2.5% | | | 2.5% - 5% | | | 5% - 10% | | |
| | Tipo de finos | | | Tipo de finos | | | Tipo de finos | | |
| | Filler | Limo | Arcilla | filler | limo | Arcilla | filler | limo | Arcilla |
| Grava | 70 | 60 | 40 | 60 | 40 | 20 | 40 | 30 | 10 |
| Arena | 57 | 50 | 35 | 50 | 35 | 15 | 35 | 18 | - 8 |

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002. Página 129.

Calcular:

- Porosidad efectiva

$$N_c = (N_{max} * C) / 100$$

- Factor de drenaje

$$m_x = (N_c * Lr^2) / (h * k)$$

- Permeabilidad (pies/día)

$$k = \frac{6,214 \times 10^5 (D_{10})^{1,476} (N)^{6,654}}{(P_{200})^{0,597}}$$

- Porosidad

$$N = (1 - (\sigma_d / 62,4 * G))$$

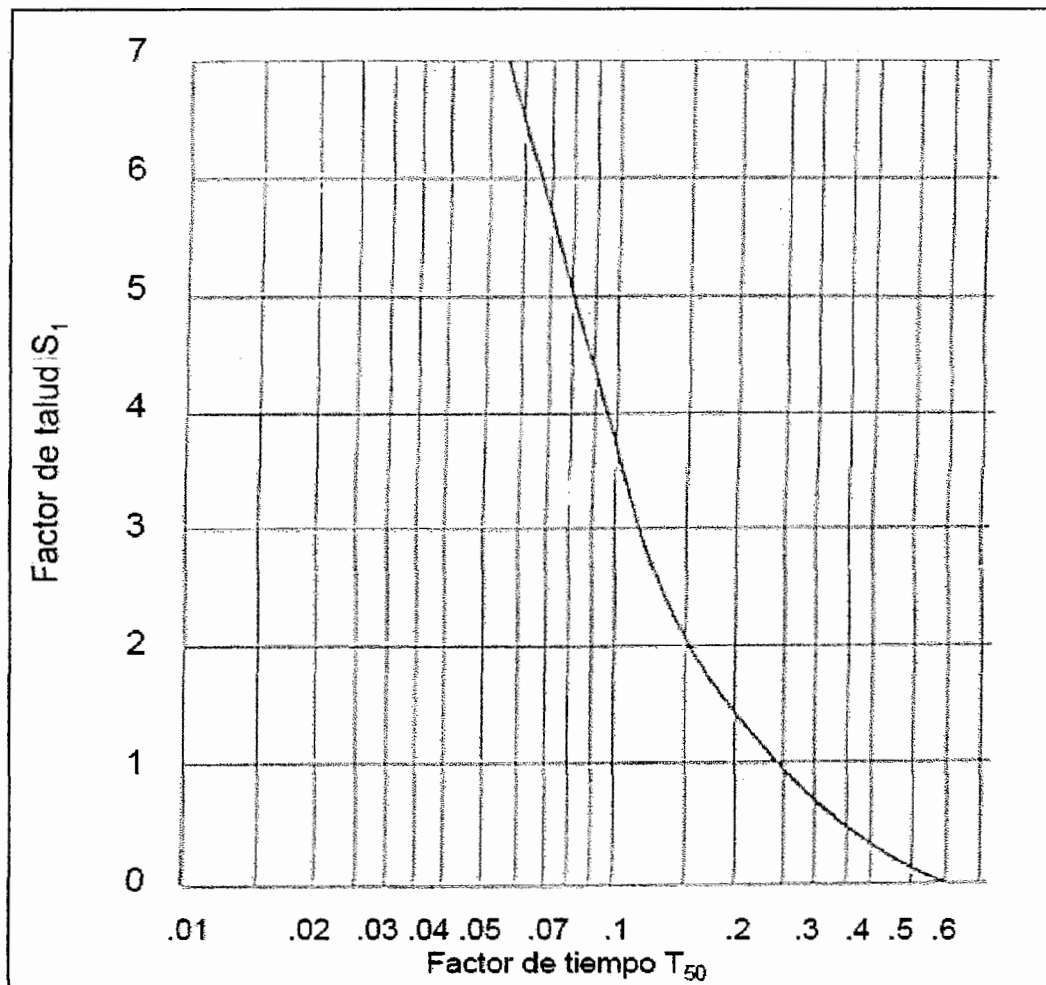
Donde:

σ_d : Densidad seca (libras / pie³)

G: Gravedad especifica igual a 2,70 como constante

Determinar el Factor de tiempo T_{50} con el valor de S_i y con la siguiente gráfica. Figura 16.

Figura 16. Factor de tiempo para un drenaje del 50%



Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002. Página 131.

Calcular:

- Tiempo de drenaje (horas) $t = T_{50} \times m_x \times 24 \text{ horas}$

Con el tiempo "t" en horas, se puede determinar si la capa tiene una excelente capacidad de drenaje o muy pobre, de acuerdo con los valores que se tienen para cada calidad de drenaje, para lo cual se utilizarán los valores que se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla XXV. Tiempos de drenaje para capas granulares

| Calidad del Drenaje | 50% de saturación |
|---------------------|-------------------|
| Excelente | 2 horas |
| Bueno | 1 día |
| Regular | 1 semana |
| Pobre | 1 mes |
| Muy pobre | El agua no drena |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

2.1.6. Confiabilidad

La confiabilidad está definida como la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante la vida útil en condiciones adecuadas para su operación. Otra manera de entender la confiabilidad, por ejemplo es: si se considera una confiabilidad "R" del 80%, se estaría permitiendo que el 20% de las losas de pavimento alcancen al final de su vida útil, una serviciabilidad igual a la serviciabilidad final seleccionada en el diseño. Los factores estadísticos que influyen en el comportamiento de los pavimentos son:

- Confiabilidad R
- Desviación Estándar

Los valores de confiabilidad R, se pueden ver en las tablas XXVI y XXVII.

Tabla XXVI. Valores 1 de confiabilidad R

| Clasificación funcional | Urbano | Rural |
|-----------------------------|-------------|-------------|
| Autopistas | 85% - 99.9% | 80% - 99.9% |
| Arterias principales | 80% - 99% | 75% - 99% |
| Colectoras | 80% - 95% | 75% - 95% |
| Locales | 50% - 80% | 50% - 80% |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla XXVII. Valores 2 de confiabilidad R

| Tipo de carretera | Suburbanas | Rurales |
|---------------------------|-------------|-------------|
| Autopista regional | 85% - 99.9% | 80% - 99.9% |
| Troncales | 80% - 99% | 75% - 95% |
| Colectoras | 80% - 95% | 50% - 80% |

Fuente: Manual centroamericano para el diseño geométrico de las carreteras regionales, SIECA, 2001.

Tomando en cuenta que el valor de confiabilidad, se refiere al grado de seguridad en que el diseño de la estructura de un pavimento pueda llegar al final de su período de vida útil en buenas condiciones, la confiabilidad puede relacionarse con un factor de seguridad. A continuación, se dan los factores de seguridad aproximados a los que corresponde la confiabilidad "R", y donde estos factores van asociados con la desviación estándar "So". Ver tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. Factores de seguridad FS

| Desviación estándar So | R 50% | R 60% | R 70% | R 80% | R 90% | R 95% |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.30 | 1.00 | 1.19 | 1.44 | 1.79 | 2.42 | 3.12 |
| 0.35 | 1.00 | 1.23 | 1.53 | 1.97 | 2.81 | 3.76 |
| 0.39 | 1.00 | 1.26 | 1.60 | 2.13 | 3.16 | 4.38 |
| 0.40 | 1.00 | 1.26 | 1.62 | 2.17 | 3.26 | 4.55 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

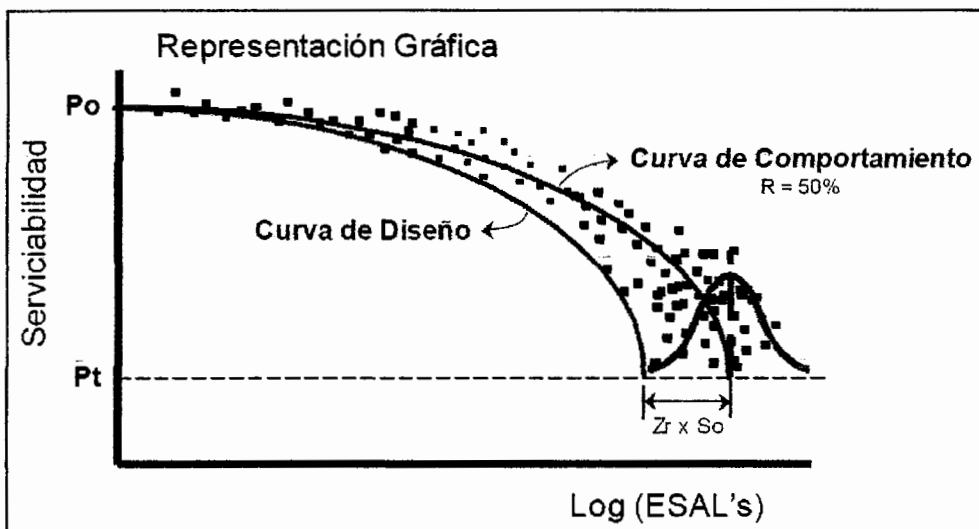
Se recomienda utilizar valores de desviación estándar "So" comprendidos dentro de los siguientes rangos.

- Para pavimentos flexibles 0,40 – 0,50
 - En construcción nueva 0,35 – 0,40
 - En sobre-capas 0,50

- Para pavimentos rígidos 0,30 – 0,40
 - En construcción nueva 0,35
 - En sobre-capas 0,40

El producto de ($Z_r \times S_o$), efectivamente, es un factor de seguridad que se aplica a la estimación del tránsito de una carretera, en la fórmula de diseño de la AASHTO, esta misma recomienda que el factor de seguridad esté en función del tránsito que circula sobre el carril de diseño. Ver figura 17 y tabla XXIX.

Figura 17. Gráfica del comportamiento de la confiabilidad R



Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 27.

Tabla XXIX. Confiabilidad R según el tránsito en el carril de diseño

| Tránsito esperado en el carril de diseño en millones de ejes equivalentes | Confiabilidad R |
|--|------------------------|
| <5 | 50 |
| 5 – 15 | 50 – 60 |
| 15 – 30 | 60 – 70 |
| 30 – 50 | 70 – 75 |
| 50 – 70 | 75 – 80 |
| 70 – 90 | 80 - 85 |

Fuente: Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto, Londoño, Cipriano, 2001.

Para poder encontrar el valor de Z_r , utilizamos la siguiente expresión:

$$Z_r = (-\log FS)/S_o$$

Donde:

Z_r : Desviación normal estándar para R

FS: Factor de seguridad

S_o : Desviación estándar

O bien se pueden utilizar los valores que proporciona la AASHTO de Z_r en función de R, los cuales se describen en la siguiente tabla.

Tabla XXX. Valores de Zr en función de la confiabilidad R

| Confiabilidad R | Desviación normal estándar Zr |
|-----------------|-------------------------------|
| 50 | -0,000 |
| 60 | -0,253 |
| 70 | -0,524 |
| 75 | -0,674 |
| 80 | -0,841 |
| 85 | -1,037 |
| 90 | -1,282 |
| 91 | -1,340 |
| 92 | -1,405 |
| 93 | -1,476 |
| 94 | -1,555 |
| 95 | -1,645 |
| 96 | -1,751 |
| 97 | -1,881 |
| 98 | -2,054 |
| 99 | -2,327 |
| 99.9 | -3,090 |
| 99.99 | -3,750 |

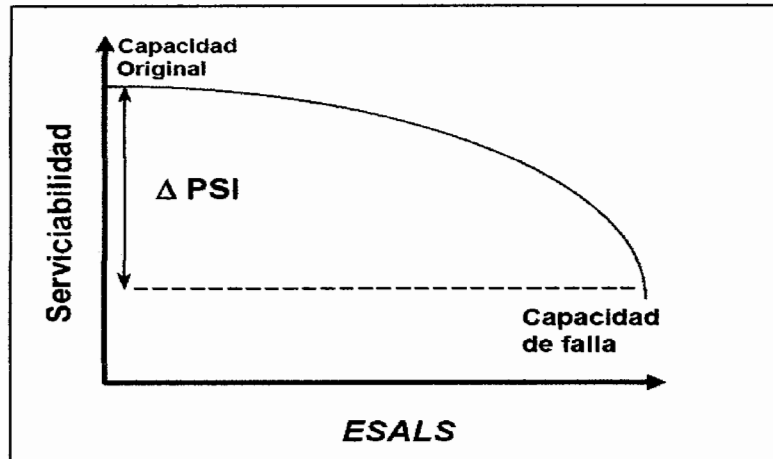
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

2.1.7. Serviciabilidad

El procedimiento de diseño predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea la diferencia de serviciabilidad, mayor será la capacidad de carga que tendrá la estructura de pavimento antes de fallar.

En la siguiente gráfica se puede ver la pérdida de serviciabilidad de acuerdo a la capacidad de falla con respecto a la carga de ejes equivalentes.

Figura 18. Pérdida de serviciabilidad



Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 13.

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico que circula en la vía, se mide en una escala de 0 a 5 (ver tabla XXXI), donde el valor de cero significa una calificación para un pavimento intransitable y un valor de cinco para un pavimento excelente. La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo, la tendencia es poder definirla con parámetros medibles como lo son:

- El índice de perfil
- Índice de rugosidad internacional
- Coeficiente de fricción
- Distancias de frenado
- Visibilidad

Tabla XXXI Valores de serviciabilidad

| Calificación | Excelente | Muy bueno | Bueno | Regular | Malo | Intransitable |
|--------------------|-----------|-----------|-------|---------|------|---------------|
| Índice de servicio | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |

Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 14.

La pérdida de serviciabilidad está dada por la fórmula:

$$\Delta\text{PSI} = P_0 - P_t$$

Donde:

ΔPSI : Pérdida de serviciabilidad

P_0 : Serviciabilidad inicial

P_t : Serviciabilidad final

La serviciabilidad inicial es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Los valores recomendados para este parámetro son:

- Para pavimento rígido 4,5
- Para pavimento flexible 4,2

Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento puede tener una serviciabilidad inicial de 4,7 o 4,8.

La serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que se espera que tenga el pavimento al final de su vida útil. Los valores recomendados para este parámetro son:

- Para caminos principales 2,5
- Para caminos de tránsito menor 2,0

2.1.8. Transferencia de carga

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura de pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas, mejor será el comportamiento de las losas de pavimento.

El método AASHTO considera las transferencias de cargas mediante el factor de transferencia de carga J.

La efectividad de la transferencia de carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

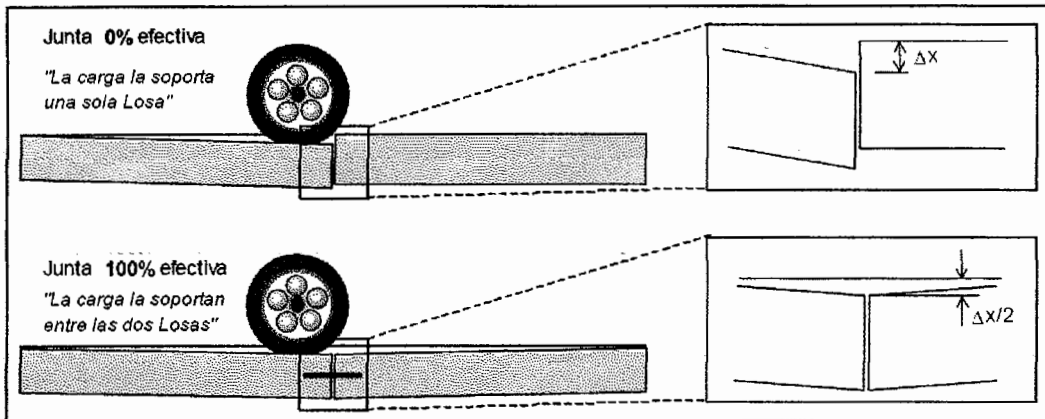
- Cantidad de tráfico
- Utilización de pasajuntas
- Soporte lateral de las losas

Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante el roce entre las caras de la junta, donde su eficiencia depende básicamente de la abertura de la junta y la angulosidad de los agregados, sin embargo, esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero. La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas (ver figura 19), los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas. Utilizar pasajuntas cuando:

- El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- El número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5 millones de ESAL's

El coeficiente de transferencia de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.

Figura 19. Efectividad de juntas de transferencia de carga



Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 19.

El confinamiento que produce el soporte lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generen en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección. Figuras 20, 21 y 22.

Figura 20. Carril ancho $\geq 4,0$ m

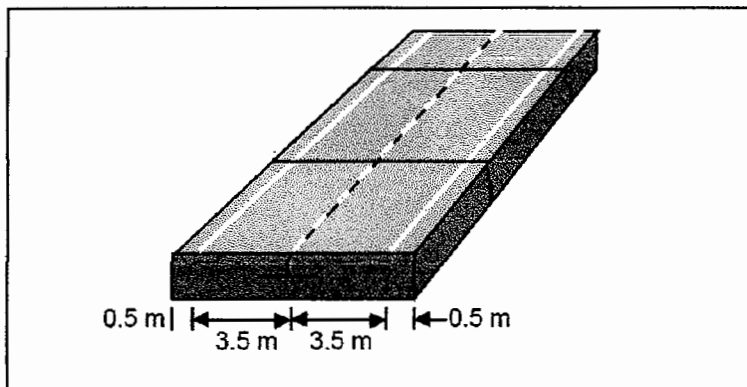


Figura 21. Confinamiento con guarniciones o banquetas

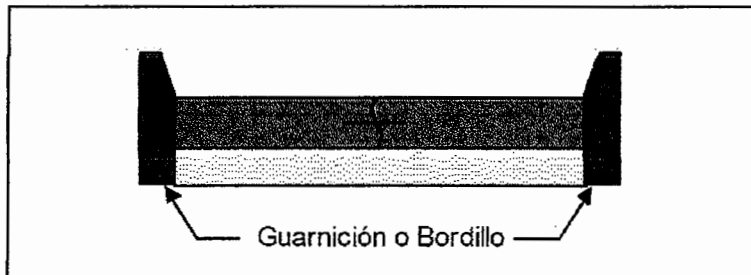
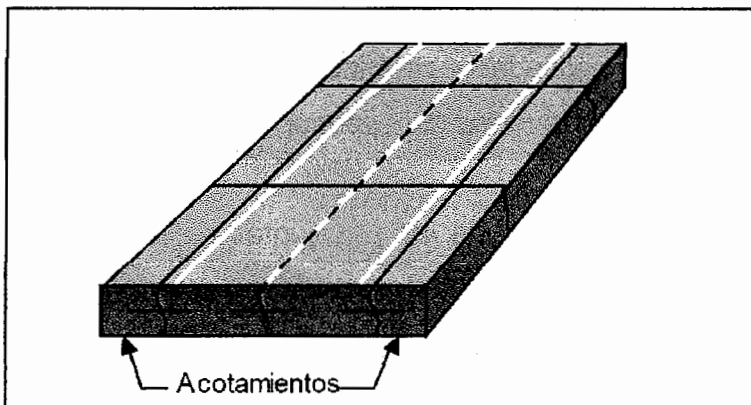


Figura 22. Losa con acotamientos laterales



Se considera un pavimento rígido confinado, cuando los extremos de las losas tienen elementos de la misma rigidez que ella, para el caso de un hombro de concreto, confina la parte principal de la carretera y el coeficiente de transferencia de carga tiende a ser menor, por lo tanto la losa también será de menor espesor. Un hombro de asfalto tiene menor rigidez que la parte principal de la carretera y se considera semi-confinada, por lo que al ser mayor el coeficiente de transferencia de carga el espesor de la losa aumenta.

En la siguiente tabla se dan valores de transferencia de carga de acuerdo al tipo de hombro y si está reforzado con pasajuntas.

Tabla XXXII. Valores de coeficiente de transferencia de carga J

| Hombro | Concreto asfáltico | | Concreto hidráulico | |
|-------------------------------------|--------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | si | no | si | no |
| Tipo de pavimento | | | | |
| No reforzado o reforzado con juntas | 3.2 | 3.8 - 4.4 | 2.5 - 3.1 | 3.6 - 4.2 |
| Reforzado continuo | 2.9 - 3.2 | | 2.3 - 2.9 | |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Las barras de acero que servirán como pasajuntas deben de ser barras lisas con un $f_y = 4\ 200\ \text{kg/cm}^2$, la cual no se debe adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de losas longitudinales, pero si debe transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Estas se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa.

El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas está en función del espesor de las losas principalmente. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la barra son las siguientes:

Figura 23. Características de las barras pasajuntas

| Espesor de Losa | | Barras Pasajuntas | | | | | |
|-----------------|---------|-------------------|-------|----------|----|------------|----|
| | | Diámetro | | Longitud | | Separación | |
| cm | in | mm | in | cm | in | cm | in |
| 13 a 15 | 5 a 6 | 19 | 3/4 | 41 | 16 | 30 | 12 |
| 15 a 20 | 6 a 8 | 25 | 1 | 46 | 18 | 30 | 12 |
| 20 a 30 | 8 a 12 | 32 | 1 1/4 | 46 | 18 | 30 | 12 |
| 30 a 43 | 12 a 17 | 38 | 1 1/2 | 51 | 20 | 38 | 15 |
| 43 a 50 | 17 a 20 | 45 | 1 3/4 | 56 | 22 | 46 | 18 |

Fuente: Diseño de pavimentos de concreto hidráulico, Cemex, página 20.

2.2. Ecuación para el diseño de la estructura de pavimento flexible

Para el diseño de espesores en pavimentos flexibles, se usará la fórmula determinada por la AASHTO, figura 24, en la cual intervienen todas las variables que fueron analizadas en el inciso 2.1 del capítulo 2, con las cuales se determina el número estructural SN, la incógnita en la ecuación, pero este no debe diferir demasiado con el SN asumido para los factores equivalentes de carga, de lo contrario se deberá hacer una nueva iteración hasta que el SN asumido no difiera demasiado con el valor calculado.

Figura 24. Fórmula de diseño para pavimento flexible

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07$$

Desviación estándar normal *Desviación estándar global* *Número estructural* *Cambio en la Serviciabilidad*
Ejes equivalentes *Módulo de resistencia*

Donde:

ESAL: Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 KN) calculado conforme al tránsito vehicular.

Z_R: Es el valor de la desviación normal estándar para una confiabilidad R.

S_o: Es la desviación estándar para todas las variables.

ΔPSI: Es la pérdida de serviciabilidad.

Mr: Módulo de resiliencia de la subrasante.

SN: Número estructural.

Existen dos aspectos muy importantes que deben de tomarse y son:

- El periodo de diseño
- La vida útil del pavimento

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

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

El periodo de diseño puede llegar a ser igual a la vida útil de un pavimento; en los casos en que se consideren reconstrucciones o rehabilitaciones a lo largo del tiempo, el periodo de diseño comprende varias etapas de vida útil que son, el del pavimento original y el de las rehabilitaciones. Se recomiendan ciertos valores de diseño como en la tabla XXXIII.

Tabla XXXIII. Períodos de diseño

| Tipo de carretera | Periodo de diseño |
|-----------------------|-------------------|
| Autopista regional | 20 – 40 años |
| Troncales suburbanas | 15 – 30 años |
| Troncales rurales | |
| Colectoras suburbanas | 10 – 20 años |
| Colectoras rurales | |

Fuente: Manual centroamericano de normas para el diseño geométrico de las carreteras regionales, SIECA, 2001.

2.3. Número estructural SN de la estructura de pavimento flexible

Después de haber determinado el valor del número estructural SN real, en la ecuación de diseño, se debe encontrar los espesores de las capas de la estructura con la fórmula general que relaciona estos valores:

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

Donde:

a_i: Son los coeficientes estructurales de capa (carpeta, base y sub-base)

D_i: Son los espesores de cada capa (carpeta, base y sub-base)

m_i: Son los coeficientes de drenaje para base y sub-base

Tomando en cuenta que esta fórmula tiene varias posibles soluciones, debido a la combinación de diferentes espesores, se han establecido espesores mínimos para la carpeta de rodadura y para la base, quedando el espesor de la sub-base a solicitud de las otras capas. Tabla XXXIV.

Tabla XXXIV. Espesores mínimos sugeridos

| Número de ESAL's | Capa de mezcla asfáltica | Base granular |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Menos de 50 000 | 1,0 pulg | 4,0 pulg |
| 50 000 – 150 000 | 2,0 pulg | 4,0 pulg |
| 150 000 – 500 000 | 2,5 pulg | 4,0 pulg |
| 500 000 – 2 000 000 | 3,0 pulg | 6,0 pulg |
| 2 000 000 – 7 000 000 | 3,5 pulg | 6,0 pulg |
| Más de 7 000 000 | 4,0 pulg | 6,0 pulg |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

El diseñador puede determinar si es necesario modificar hacia arriba los espesores mínimos de acuerdo con su experiencia para evitar una variación excesiva entre espesores.

2.4. Ecuación para el diseño de la estructura de pavimento rígido

Para el diseño de espesor de losa en pavimentos rígidos, se usará la fórmula determinada por la AASHTO, figura 25, en la cual intervienen todas las variables que fueron analizadas en el inciso 2.1 del capítulo 2, con las cuales se determina el espesor de losa D , la incógnita en la ecuación, pero este no debe diferir demasiado con el espesor asumido para los factores equivalentes de carga, de lo contrario se deberá hacer una nueva iteración hasta que el espesor D asumido, no difiera demasiado con el valor real calculado.

Figura 25. Fórmula de diseño para pavimento rígido

$$\begin{aligned}
 \log_{10}(ESAL) = & Z_R S_o + 7.35 \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \left[\frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} \right] \\
 & + (4.22 - 0.32 p_t) \log_{10} \left[\frac{S'_c C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c / k)^{0.25}} \right]} \right]
 \end{aligned}$$

Desviación estándar normal (pointing to Z_R), *Desviación estándar global* (pointing to S_o), *Espeor* (pointing to D), *Cambio en la Serviciabilidad* (pointing to ΔPSI), *Módulo de ruptura* (pointing to S'_c), *Coefficiente de drenaje* (pointing to C_d), *Serviciabilidad terminal* (pointing to p_t), *Transferencia de carga* (pointing to J), *Módulo de elasticidad* (pointing to E_c), *Módulo de reacción del subgrado* (pointing to k).

Donde:

ESAL: Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculado conforme al tránsito vehicular.

Z_R: Es el valor de la desviación normal estándar para una confiabilidad R.

S_o: Es la desviación estándar para todas las variables.

D: Espesor de losa de concreto (pulg)

ΔPSI: Es la pérdida de serviciabilidad.

P_t: Índice de serviciabilidad final.

S'_c: Módulo de ruptura del concreto o (MR) especificado a 28 días (psi).

C_d: Coeficiente de drenaje.

J: Coeficiente de transferencia de carga.

E_c: Módulo de elasticidad del concreto (psi).

K: Módulo de reacción de la subrasante (pci).

Las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos constituyen la base del diseño por lo que es importante conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos al mismo tiempo.

Al igual que para los pavimentos flexibles el periodo de diseño puede llegar a ser igual que la vida útil del mismo, para lo cual se recomiendan los mismos valores de periodo de diseño.

3. METODOLOGÍA DE ENSAYOS

3.1. Recolección de muestras en campo

En todo proyecto de carretera, el éxito está basado en el comportamiento que pueda tener el material que servirá como base de sostenimiento de toda la estructura. Es por esto que debemos contar con análisis de muestras de suelos representativas del lugar y con lo cual se debe saber y conocer el tipo de muestra que tenemos que recolectar en campo.

La exploración de los suelos en lugar o tramo de construcción es un prerequisite indispensable que permitirá seleccionar materiales adecuados y los materiales que son inconvenientes.

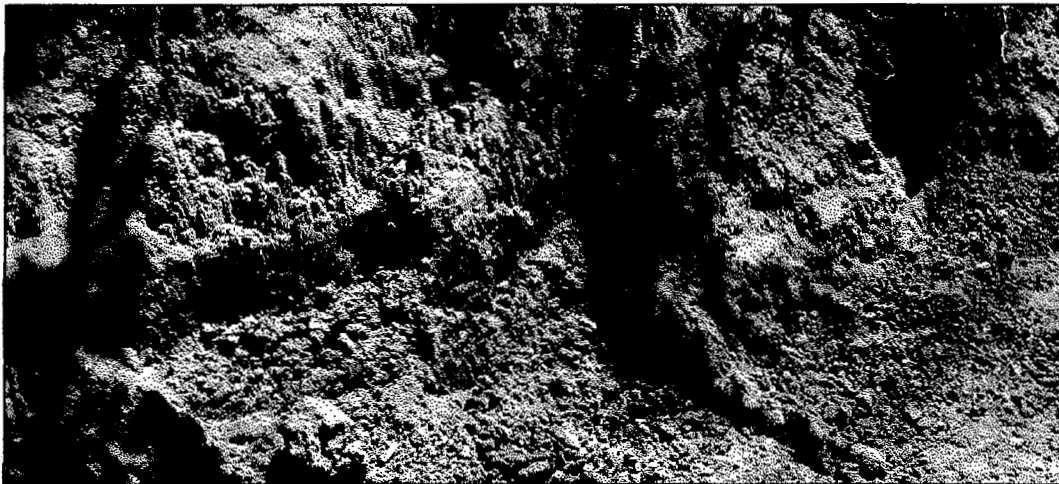
3.1.1. Tipo de muestra a considerar para el diseño de la estructura de pavimento

Como ya se mencionó con anterioridad, el tipo de suelo para diseñar la estructura es básicamente el suelo de subrasante, el cual por lo regular, tiende a ser un suelo cohesivo con propiedades resilientes, siempre y cuando este no exceda ciertos valores de IP ya mencionados.

Los tipos de suelos que por lo regular se utilizan como subrasante en nuestro medio, son conocidos como suelos limosos, arcillosos o combinación de ambos e incluso con presencia de arena. También en algunas zonas del país como en las regiones costeras se suele utilizar arenas con presencia de

limo para que este último proporcione la cohesión a la mezcla. En pocas palabras, se puede decir que los tipos de material que se utiliza es el suelo fino, ya que el suelo tipo granular se utiliza más bien como materiales para bases y sub-bases.

Figura 26. Suelo para subrasante



3.1.2. Determinación del lugar de la extracción

La determinación del lugar consiste en recorrer el tramo donde se construirá la carretera y determinar los puntos en los cuales se considere que existen cambios en el tipo de suelo. El ingeniero o los encargados de determinar esos puntos deben tomar en cuenta que el diseño se realiza por lo regular con varios tipos de subrasante, pero la estructura se diseña para que se acople a los cambios de resistencia de los diferentes suelos en todo el tramo.

Por ejemplo, la AASHTO recomienda realizar promedios con los módulos de resiliencia y de reacción de la diferentes subrasantes encontradas en el lugar, pero siempre y cuando estas no difieran exageradamente una del resto,

de lo contrario se tiene la obligación de excluir dicho material y realizar una sustitución o bien una estabilización de ese material según lo convenido. Es por ello la gran importancia de determinar todos los lugares o puntos de extracción de muestra donde se considere que el material varía con los demás, y así, tener la mejor información posible de los cambios de resistencia en todo el recorrido del proyecto.

Los puntos de extracción de las distintas muestras se deben de marcar con el número de estación en el tramo y también especificar en cuál estación empieza y en cuál estación termina determinado tipo de suelo. Esto se debe que en algunas ocasiones los diseñadores optan por diferentes espesores en la estructura de pavimento a lo largo de todo este, con el fin de optimizar los recursos de acuerdo al tipo de suelo o bien cuando en todo el trayecto solo existen dos tipos diferentes de subrasante y los tramos son bastante largos.

3.1.3. Procedimientos de extracción

Tomando en cuenta que el tipo de muestra para estudiar es alterada, el proceso de extracción es bastante sencillo y rápido. Una vez definido el lugar de extracción simplemente se realiza un agujero de por lo menos 0,45 metros de profundidad de donde a partir de esa misma cota se tomará la muestra y se colocará en sacos limpios sin residuos de material existente.

El agujero se realizará con herramientas como palas, azadones, y en caso de mucha dureza del material se utilizará una piocha o barreta para logra hacer el agujero, que tendrá un diámetro suficiente en el cual se haga fácil la manipulación de las herramientas de trabajo y la extracción del material.

En el caso de que el tramo no sea nuevo y haya un camino ya existente pero con material de balasto o cualquier otro tipo de material granular compactado, se deberá excavar hasta encontrar el suelo de subrasante y por lo tanto se debe de realizar un agujero de por lo menos 0,60 metros de profundidad, con lo cual se pueda asegurar que encuentran en una parte media del suelo de subrasante.

Donde se encuentre un camino con una antigua capa de pavimento, se tendrá que realizar calicatas con una profundidad mínima de 0,70 metros o hasta encontrar una parte media del material de subrasante y con dimensiones mínimas de 0,60 x 0,60 metros, con lo cual no existan inconvenientes para extraer la muestra o las muestras.

En la figura 27 se tiene la toma de muestra, la cual fue tomada para efecto de este trabajo a un costado de una carretera ya existente, en donde el material que se encuentra en un pequeño corte, es el mismo que el utilizado como subrasante actual.

Dichas muestra se colocaron en sacos limpios y sin residuos de otros materiales que pudieran contaminar el suelo y después trasladados al laboratorio para sus respectivos ensayos.

Figura 27. Extracción de muestra alterada



3.1.4. Forma de transporte

El traslado del material desde el punto de su recolección hasta el laboratorio se hará en el medio de transporte del cual se disponga. Es importante que los sacos donde van las muestras estén bien amarrados para que el material no se salga y se mezcle con las otras muestras debido al movimiento natural del vehículo.

Las diferentes muestras deben ir debidamente identificadas con una tarjeta dentro del saco donde se especifique el nombre del proyecto, interesado, estación y número de muestra.

Figura 28. Traslado de muestras



3.2. Equipo utilizado en laboratorio

El equipo utilizado para los diferentes ensayos que se realizarán a las muestras de subrasante serán descritos a continuación.

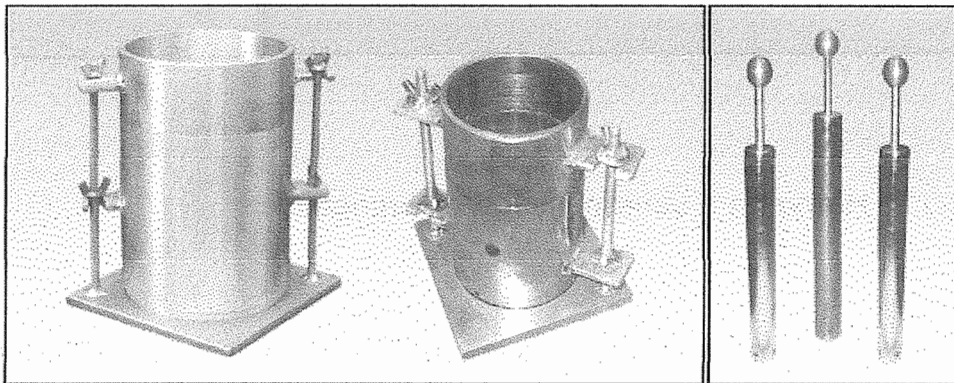
- Moldes y martillo para el ensayo de proctor
- Moldes y martillo para ensayo de C.B.R.
- Horno para determinación de humedades
- Máquina para determinar el valor de Relación Soporte California
- Máquina de compresión triaxial
- Tallador de muestras
- Enseres complementarios

3.2.1. Moldes y martillo para el ensayo de proctor

Para el ensayo de proctor se utilizará equipo estandarizado por la norma AASHTO T-180 para proctor modificado.

- Molde de 4" de diámetro y 4,6" de altura
- Martillo de 18" de caída libre y 10 libras de peso

Figura 29. Molde y martillo para proctor

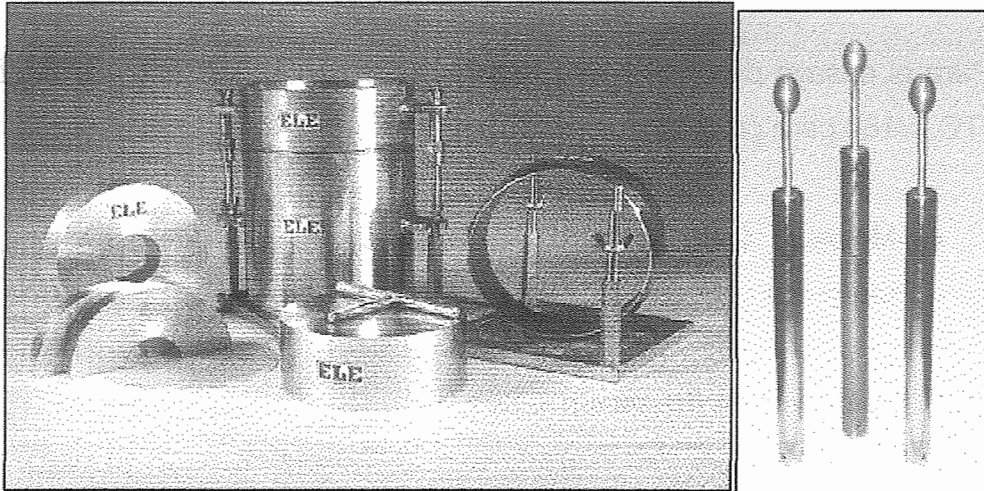


3.2.2. Moldes y martillo para el ensayo de C.B.R.

Para el ensayo de Relación Soporte California se utilizará equipo estandarizado por la norma AASHTO T-193.

- Molde de 6" de diámetro y 7" de altura más collarín
- Martillo de 18" de caída libre y 10 libras de peso

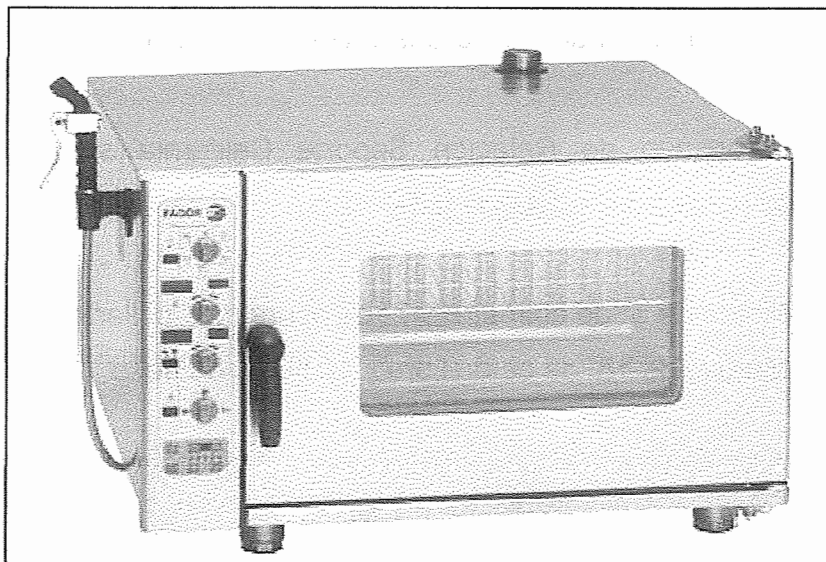
Figura 30. Molde y martillo para C.B.R.



3.2.3. Horno para determinación de humedades

Para la determinación de humedades se debe contar con un horno que pueda mantener una temperatura de entre 105 °C y 110 °C.

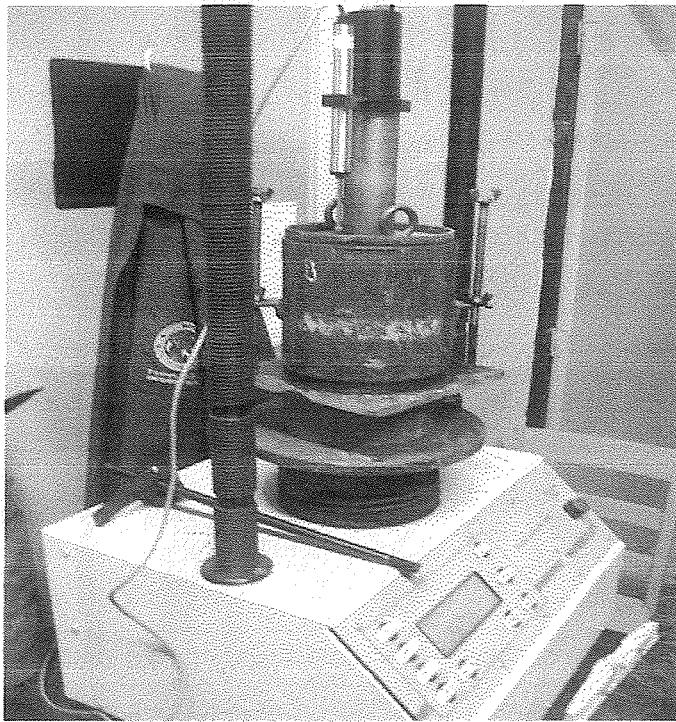
Figura 31. Horno eléctrico para humedades



3.2.4. Máquina para determinar el valor de Relación Soporte California

Para obtener los valores de carga que resiste a la penetración un material compactado, se utilizará una prensa hidráulica digital, como se ve en la figura 32.

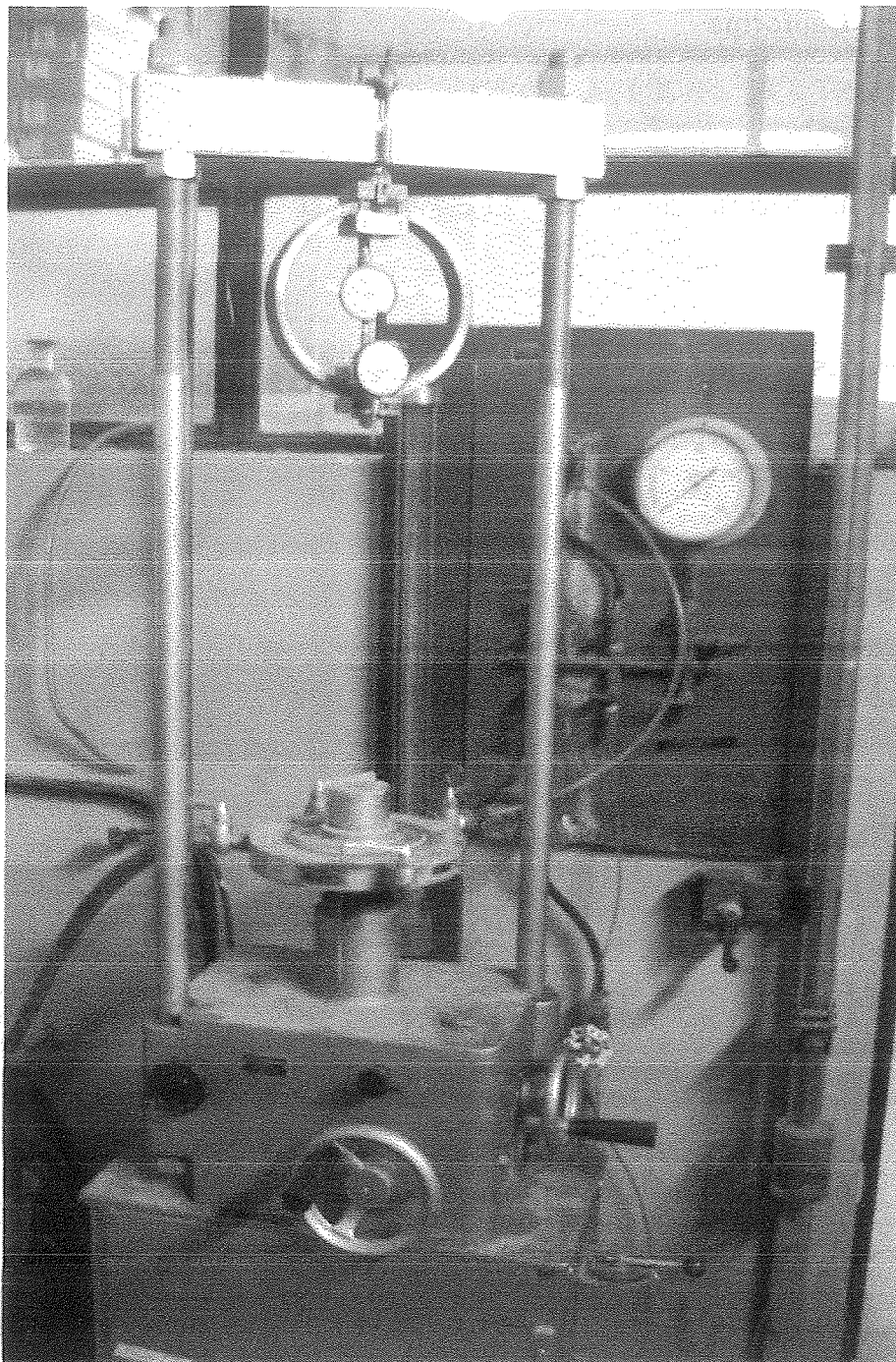
Figura 32. Prensa digital para C.B.R.



3.2.5. Máquina de compresión triaxial

La máquina para el ensayo de compresión triaxial que se utilizará se puede apreciar en la figura 33.

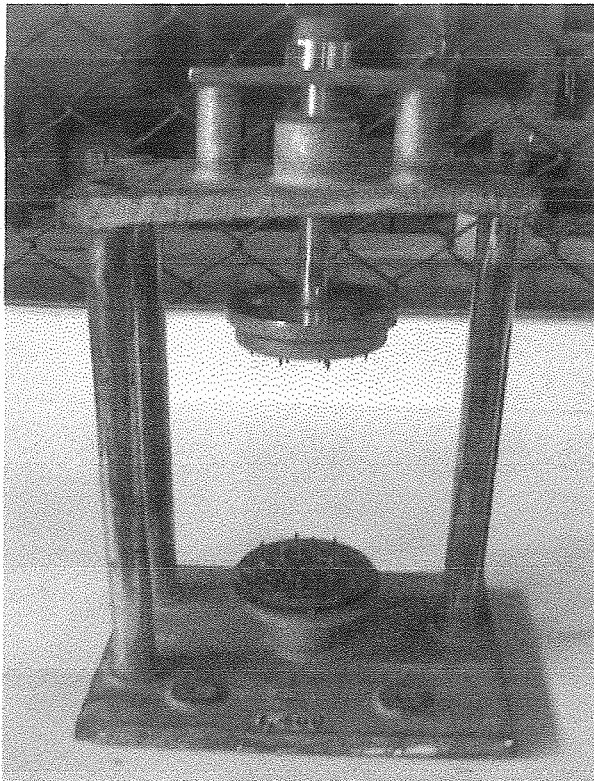
Figura 33. Máquina de compresión triaxial



3.2.6. Tallador de muestras

El tallador utilizado para las probetas de triaxial es para diámetro de 2,5" acorde a la máquina de compresión triaxial.

Figura 34. Tallador para muestras de 2,5" de diámetro

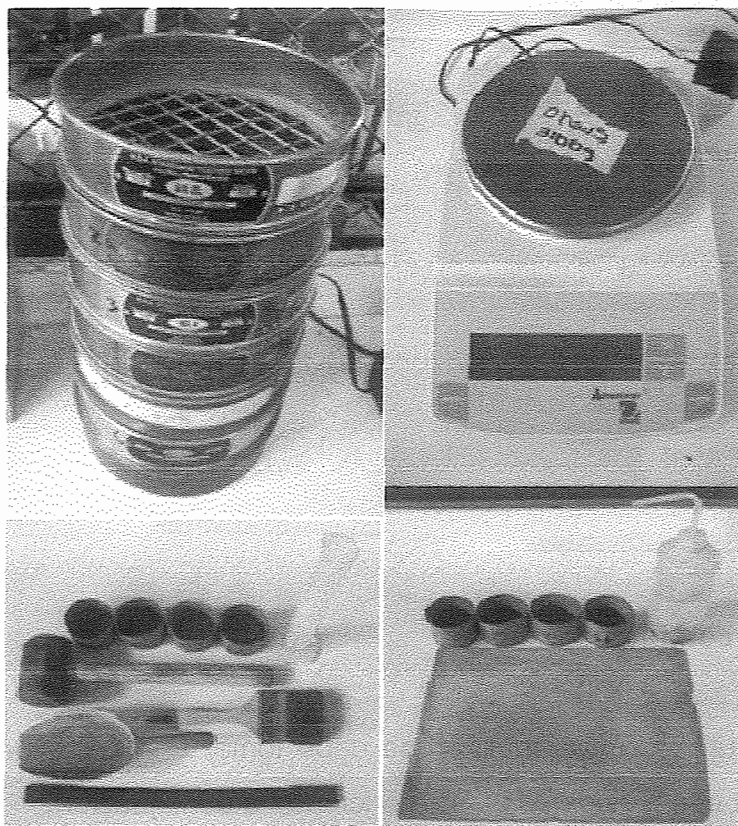


3.2.7. Enseres complementarios

Parte del equipo utilizado que también se debe tomar en cuenta para la realización de todos los ensayos debidos, se mencionan a continuación:

- Tamices
- Rasador
- Tarros
- Cucharon
- Pipeta
- Espátulas
- Vidrio esmerilado
- Aparato Casagrande
- Mazo de hule

Figura 35. Enseres complementarios



3.3. Procedimiento de laboratorio

El procedimiento en el laboratorio está basado en las normas que rigen cada uno de los ensayos realizados y la secuencia de los mismos como parte de la metodología a seguir en este capítulo.

3.3.1. Manipulación de la muestra

Desde el momento que la muestra es llevada al laboratorio, esta debe ser puesta al sol para un proceso de secado sobre una superficie de concreto limpia para evitar que se contamine con otro tipo de suelo o bien secada al horno colocando el material en diferentes bandejas, este proceso debe ser a temperaturas controladas que oscilen entre 105 °C y 110 °C para evitar que se calcine el suelo fino de la muestra y así que no cambien las propiedades mecánicas del suelo.

Después de que la muestra de suelo esté completamente seca se realiza un proceso de cuarteado, con el cual se distribuyen cantidades de muestras representativas del suelo para cada uno de los diferentes ensayos. Para el caso de los materiales de subrasante se realizaron los siguientes ensayos

- Ensayo de análisis granulométrico
- Ensayo de límites de Atterberg
- Ensayo de proctor
- Ensayo de C.B.R.
- Ensayo de compresión triaxial

3.3.2. Ensayo de análisis granulométrico

Este ensayo sirve para determinar la cantidad en porcentajes de tamaños de partículas que existen dentro de una muestra determinada de suelo, el cual consiste en separar y clasificar por tamaños los granos que lo componen por medio de una serie de tamices con un proceso de lavado y secado previo. Este ensayo se realiza conforme a las normas AASHTO T-11 y AASHTO T-27.

Para este trabajo se realizaron ensayos a cuatro muestras diferentes con el fin de obtener varios resultados y analizarlos de la mejor manera posible en la aplicación del diseño de pavimento. Los resultados de los ensayos de granulometría para estas muestras se pueden apreciar en el apéndice (figura 1, 2, 3 y 4).

Como las cuatro muestras corresponden a materiales finos, los coeficientes de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc) no se pueden calcular, y para el proceso de clasificación los porcentajes de pasa # 200 son los siguientes:

Pasa # 200 para muestra # 1.....74,8%

Pasa # 200 para muestra # 2.....48,2%

Pasa # 200 para muestra # 3.....60,3%

Pasa # 200 para muestra # 4.....78,6%

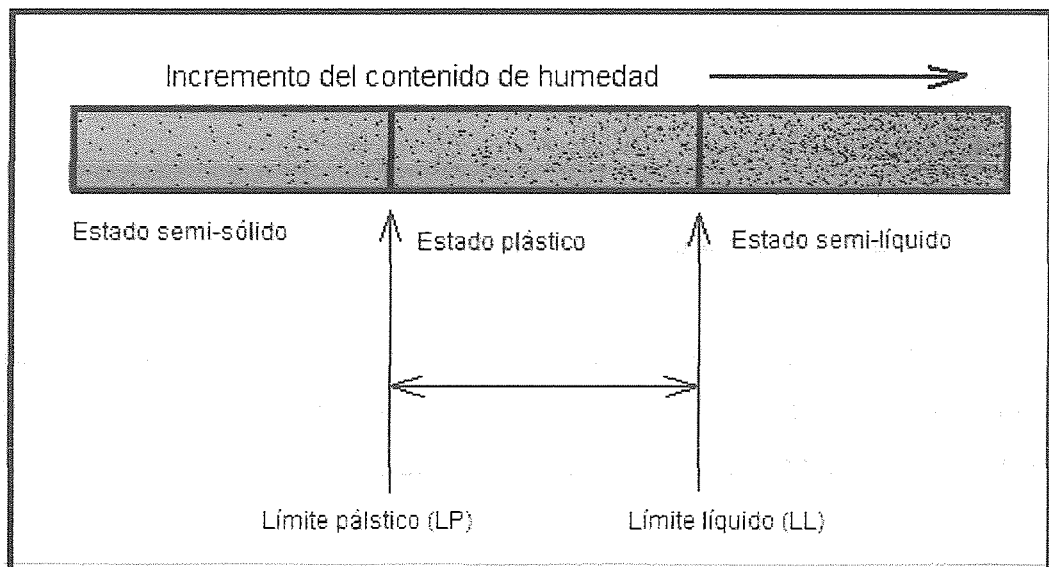
Como se puede observar los porcentajes de partículas que pasa el tamiz con malla # 200 son bastante altos, por lo tanto podemos deducir que nuestras muestras corresponden a materiales finos como arcilla o limo pero esto lo determinaremos con el ensayo de límites de Atterberg.

3.3.3. Ensayo de límites de Atterberg

Este ensayo sirve para determinar las propiedades plásticas de los suelos y conocer si son limosos o arcillosos, esto se lleva cabo por medio del estudio de los estados de consistencia de los suelos a través de pruebas bastante sencillas. El material que se utiliza para estas pruebas debe ser tamizado previamente por el tamiz # 40 y pulverizado en el caso que existan demasiados grumos en la muestra.

Para fin de este ensayo se deben determinar las fronteras existentes entre uno y otro estado de consistencia, los cuales se determinan por prácticas diferentes. Los límites o fronteras que determinaremos son el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), los cuales se encuentran entre los estados semi-líquido, plástico y semi-sólido como lo muestra la siguiente figura.

Figura 36. Estados y límites de los suelos



3.3.3.1. Límite líquido (LL)

Es el contenido de humedad en porcentaje respecto del peso seco de una muestra de suelo, de modo que esta fije la frontera que existe entre el estado semi-líquido y el estado plástico. Esta prueba se realiza con el procedimiento que ideó Casagrate y bajo la norma AASHTO T-89.

El límite líquido representa que un determinado suelos a ese contenido de humedad resiste un esfuerzo cortante de 25 gr/cm². Para las pruebas realizadas a los materiales de este trabajo se obtuvo el LL a 25 golpes por el método gráfico y dichos resultados se pueden apreciar en el apéndice (figura 5, 6, 7 y 8). Los límites líquidos encontrados para cada muestra fueron los siguientes.

| | |
|--------------------------|------|
| LL para muestra # 1..... | 47,1 |
| LL para muestra # 2..... | 51,1 |
| LL para muestra # 3..... | 42,3 |
| LL para muestra # 4..... | 43,0 |

3.3.3.2. Límite plástico (LP)

Es el contenido de humedad en porcentaje respecto del peso seco de una muestra de suelo, el cual limita la frontera que existe entre el estado plástico y el estado semi-sólido. Esta prueba se realiza bajo la norma AASHTO T-90.

Este se determina cuando se comienza a grietar un cilindro de material de 3 mm (1/8") de diámetro al rodarse sobre un vidrio esmerilado.

Los resultados obtenidos en los ensayos de límite plástico fueron los siguientes:

| | |
|--------------------------|------|
| LP para muestra # 1..... | 36,9 |
| LP para muestra # 2..... | 39,8 |
| LP para muestra # 3..... | 32,8 |
| LP para muestra # 4..... | 31,7 |

3.3.3.3. Índice plástico (IP)

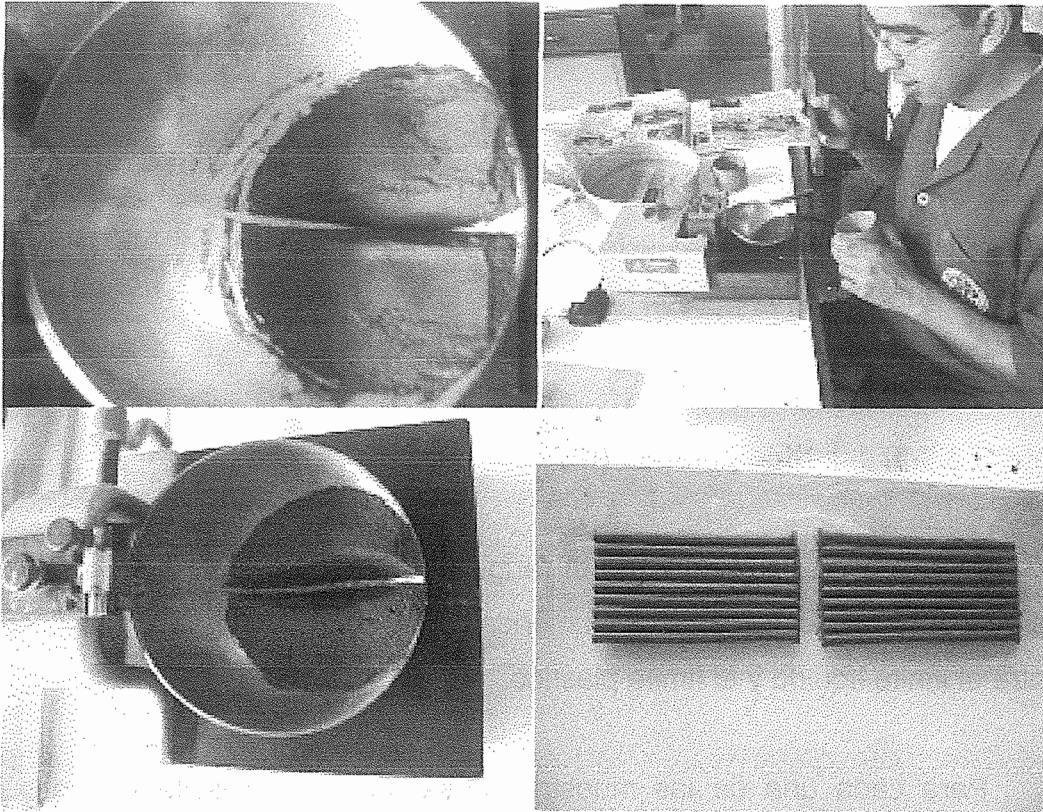
El índice de plasticidad es el rango de humedad en que se mantiene el estado plástico de un suelo y numéricamente se determina con la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Para cada una de las muestras ensayadas, los resultados se pueden observar en las figuras 5, 6, 7 y 8 del apéndice, y donde dichos índices plásticos correspondientes a cada muestra son los siguientes:

| | |
|--------------------------|------|
| IP para muestra # 1..... | 10,2 |
| IP para muestra # 2..... | 11,3 |
| IP para muestra # 3..... | 9,5 |
| IP para muestra # 4..... | 11,3 |

La técnica y secuencia en la realización de los ensayos de límites de Atterberg, se ilustra en la figura 37.

Figura 37. Ensayos de límites de Atterberg



3.3.4. Ensayo de proctor

Es el ensayo con el cual se determina la densidad máxima que puede llegar a tener un suelo, así como, su humedad óptima por medio de la compactación. La compactación es el proceso realizado generalmente por medios mecánicos para efectuar presiones sobre un material, y así, disminuir sus vacíos para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos.

Para este trabajo se realizaron proctor modificado para cada una de las muestras, bajo la norma AASHTO T-180. Los ensayos se pueden apreciar en las figuras 9, 10, 11 y 12 del apéndice. Para cada una de las muestras los resultados fueron los siguientes:

Muestra # 1:

P.U.S. máx. = 90,0 lbs/pie³

Hum. Op. = 27,5%

Muestra # 2:

P.U.S. máx. = 94,6 lbs/pie³

Hum. Op. = 24,2%

Muestra # 3:

P.U.S. máx. = 91,3 lbs/pie³

Hum. Op. = 30,4%

Muestra # 4:

P.U.S. máx. = 95,4 lbs/pie³

Hum. Op. = 25,3%

3.3.5. Ensayo de C.B.R.

Este ensayo mide la propiedad de los suelos, que les permite resistir la penetración y el escurrimiento lateral cuando se les aplica una carga, y esta depende de la habilidad que posea el suelo a la resistencia a corte. Este ensayo se realiza bajo la norma AASHTO T-193.

El C.B.R. se expresa como un porcentaje del esfuerzo requerido para hacer penetrar un pistón en un suelo compactado, con respecto al esfuerzo requerido para hacer penetrar el mismo pistón y a la misma profundidad un material patrón de roca triturada bien graduada.

Las gráficas de los ensayos para las muestras ensayadas se pueden ver en apéndice de este trabajo en la figuras 13, 14, 15 y 16. Los valores de Relación Soporte California que se obtuvieron, son los siguientes:

- Para la muestra # 1.....C.B.R. = 13,1%
- Para la muestra # 2.....C.B.R. = 20,7%
- Para la muestra # 3.....C.B.R. = 8,8%
- Para la muestra # 4.....C.B.R. = 5,6%

Figura 38. Proceso de compactación y saturación de las pastillas de C.B.R.

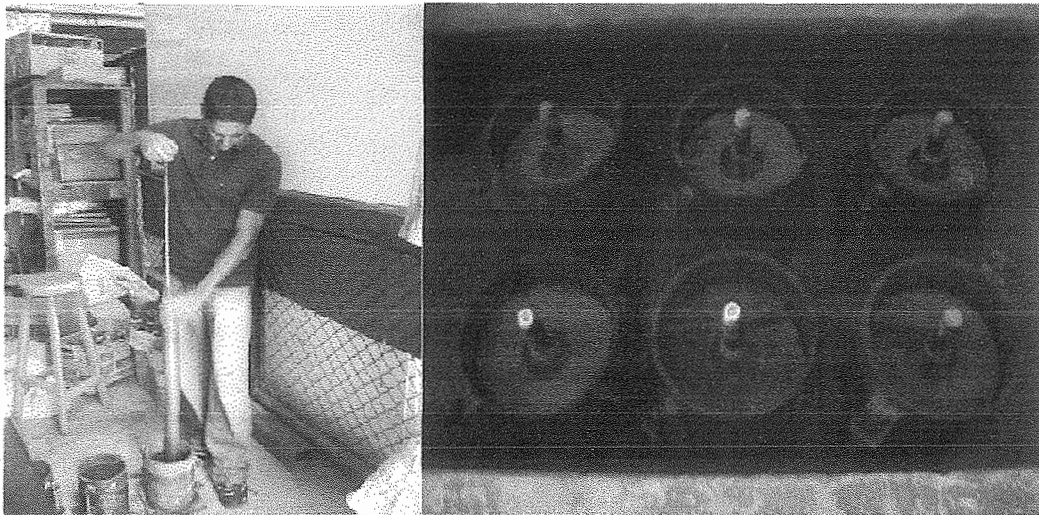
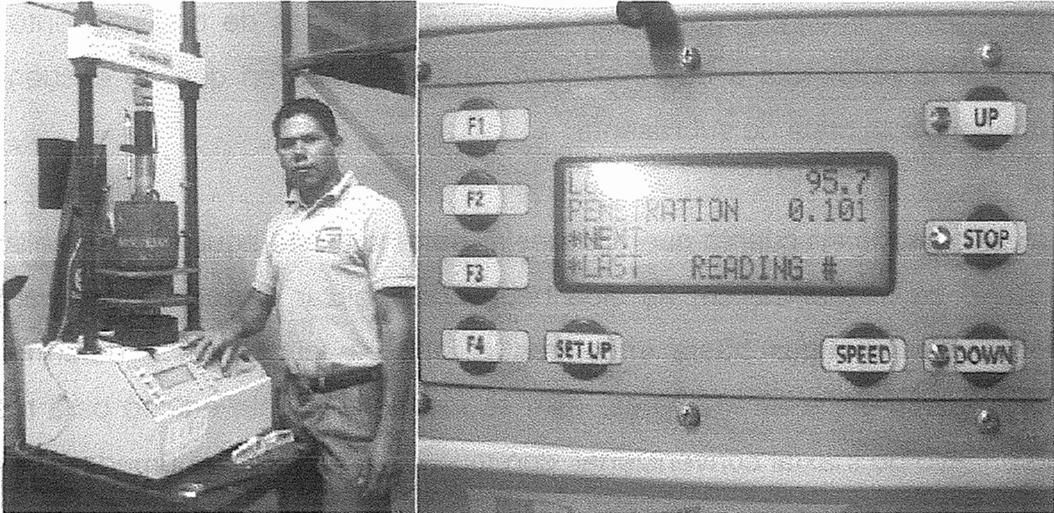


Figura 39. Proceso de aplicación de carga a las pastillas de C.B.R.



3.3.6. Ensayo de compresión triaxial

Bajo la norma AASHTO T294-92I, se desarrolla el ensayo de módulo de resiliencia mediante un triaxial cíclico, este ensayo consiste en ensayar una probeta de dimensiones normadas en una cámara de compresión triaxial, aplicándole pulsos de carga a cada segundo y con esto el material va presentando deformaciones unitarias.

Debido a las propiedades resilientes de los suelos cohesivos el material recupera cierta deformación pero no al 100% de esta, al final de cada secuencia de aproximadamente 100 pulsos de carga, se mide la deformación recuperable de la probeta. El módulo de resiliencia se calcula mediante la relación del esfuerzo desviador entre la deformación unitaria remanente, es decir, lo que no se recupera al final de la secuencia o ciclo.

Este procedimiento se realiza con diferentes contenidos de humedad arriba del óptimo, y también con diferentes presiones de confinamiento para verificar la respuesta a la variabilidad de situaciones en que se encuentre el material de la capa de subrasante.

Tomando en cuenta que en nuestro país no existe equipo para realizar un ensayo de triaxial cíclico, ha sido necesario realizar el ensayo con cargas y descargas repetidas hasta encontrar la falla de la probeta y determinar la deformación unitaria remanente, esto se realizó mediante equipo para realizar un ensayo de triaxial convencional, con muestras que tenían humedades de 3 a 5 por ciento arriba de la humedad óptima determinada mediante la prueba de proctor modificado AASHTO T-180, dichas probetas fueron compactadas a 91% de su densidad máxima, también determinada mediante proctor modificado AASHTO T-180.

Las muestras se compactaron en moldes de proctor y luego fueron talladas hasta darles las dimensiones correspondientes para luego ser sometidas a cargas y descargas. Los resultados de las pruebas se pueden ver en las figuras 17, 18, 19 y 20 del apéndice.

Los módulos de resiliencia obtenidos se dan a continuación:

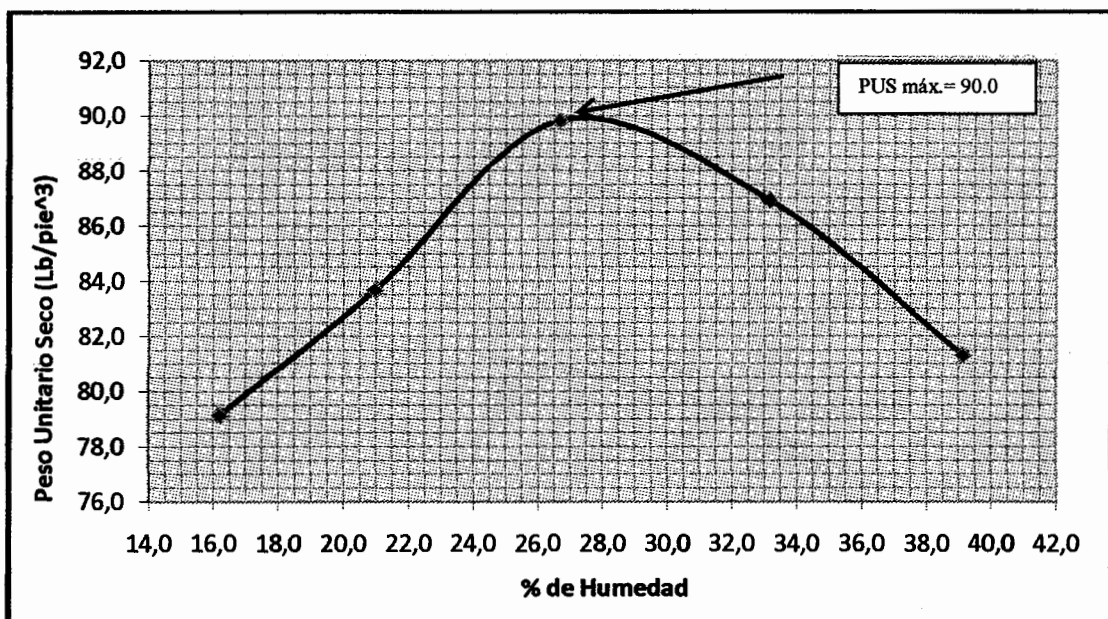
| | |
|------------------|-----------------|
| Muestra # 1..... | Mr = 10 272 psi |
| Muestra # 2..... | Mr = 14 139 psi |
| Muestra # 3..... | Mr = 8 067 psi |
| Muestra # 4..... | Mr = 5 838 psi |

4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

4.1. Determinación de la densidad máxima y valor de Relación Soporte California

La determinación de la densidad máxima consiste en encontrar el peso unitario seco máximo que puede llegar a tener un suelo, regularmente en el, este medio expresado en lbs/pie^3 . En la siguiente gráfica se puede observar la forma de plotear los datos obtenidos en la prueba descrita en la norma AASHTO T-180.

Figura 40. Gráfica PUS vs. Porcentaje de humedad



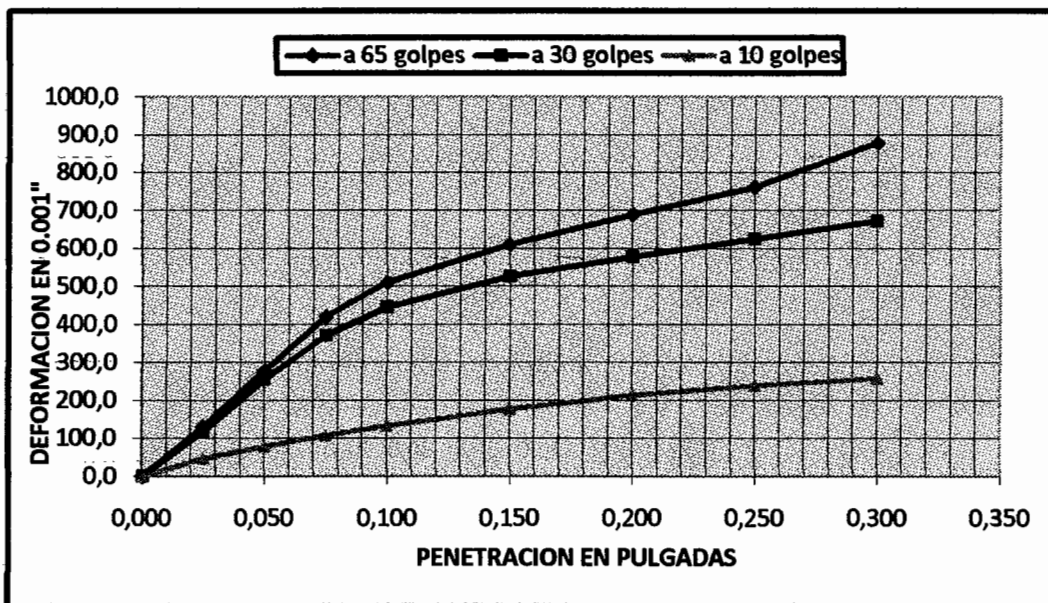
Fuente: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la gráfica anterior, el peso unitario seco máximo se encuentra en el punto más alto de la gráfica el cual tiene un valor de 90,0 lbs./pie³ y un valor correspondiente de humedad óptima igual a 27,5% de contenido de agua. Estos datos corresponden a la muestra # 1, y de igual manera se procedió para las otras muestras.

Después de encontrar el PUS máximo y el porcentaje de humedad óptimo, seguimos con la determinación del valor de Relación Soporte California mediante el ensayo de C.B.R. descrito en la norma AASHTO T-193 compactado en tres pastillas a diferentes porcentajes de compactación en relación al peso unitario seco máximo y con humedad igual o muy cercana a la humedad óptima.

Después de someterla a un proceso de saturación durante varios días, aplicamos carga con la cual obtenemos una gráfica como la siguiente.

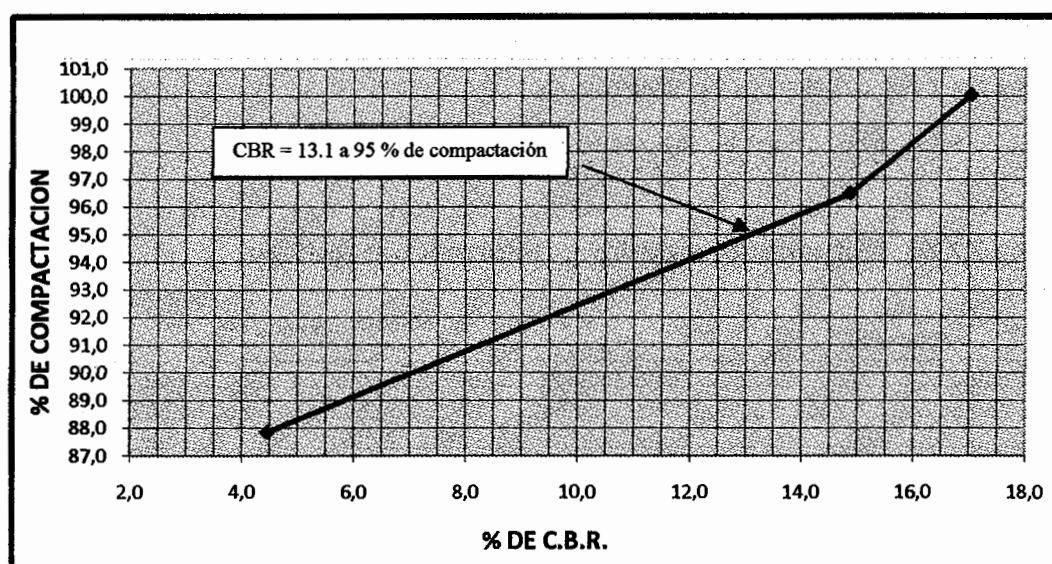
Figura 41. Deformación del anillo de carga vs. Penetración (0,001")



Fuente: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio

Con los valores de deformación del anillo de carga y penetración en pulgadas, se genera una gráfica en la cual se plotean los datos de CBR individual con sus respectivos valores de compactación en porcentaje, en dicha gráfica se encontrará el porcentaje de Relación Soporte California a 95% de compactación como se muestra a continuación.

Figura 42. Porcentaje de C.B.R. vs. Porcentaje de compactación



Fuente: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio

Se deberá tomar en cuenta que se corta la gráfica a 95% de compactación, y se obtendrá un valor de CBR igual a 13,1%. Estos datos corresponden a la muestra # 1 y de igual manera se procedió para las otras muestras. Figura 42.

4.2. Determinación del esfuerzo desviador y deformación unitaria en el ensayo de compresión triaxial

Para determinar el esfuerzo desviador que debemos de tomar, hay que tener sumo cuidado en observar las deformaciones unitarias recuperables, ya que el esfuerzo desviador corresponde al mayor encontrado, pero siempre y cuando, no exista una deformación unitaria permanente, es decir, la falla de la probeta. Para este trabajo se sometieron las probetas a tres ciclos de carga bajo una presión de confinamiento de 10 ton/m² y se obtuvieron datos como los que se muestran en la siguiente tabla.

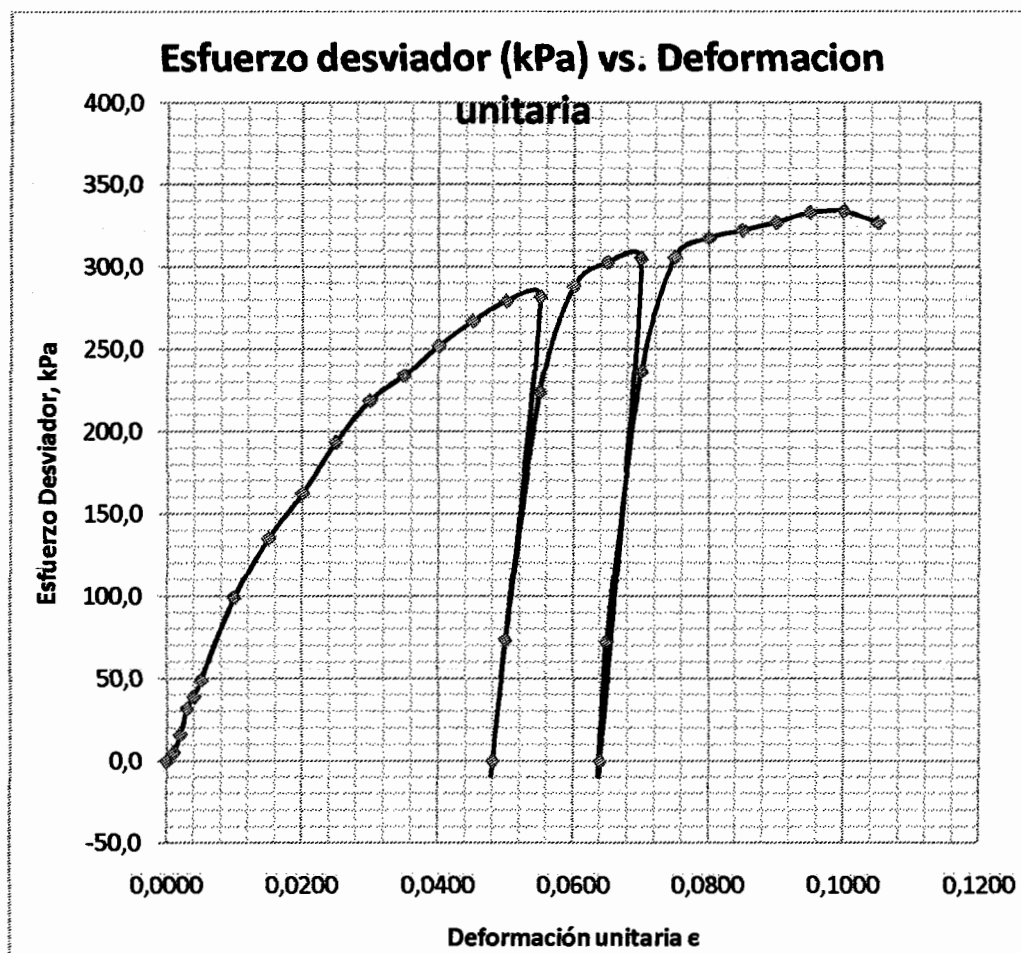
Tabla XXXV. Esfuerzo desviador y deformación unitaria

| cdos | lectura de deformimetro | X deformimetro de carga | ΔL pulg. | defor. Unitaria ΔL/Lo | factor de correc. de area 1-ε | area corregida A' cm ² | carga en kg. | esfuerzo desviador kPa | Deformación Unitaria ΔL/Lo=ε | Esfuerzo Desviador kPa |
|------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0,000 | 0,0000 | 1,000 | 31,669 | 0,00 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 |
| | 5 | 9 | 0,005 | 0,0010 | 0,999 | 31,701 | 1,53 | 4,7 | 0,0010 | 4,7 |
| | 10 | 17 | 0,010 | 0,0020 | 0,998 | 31,732 | 5,21 | 16,1 | 0,0020 | 16,1 |
| | 15 | 28 | 0,015 | 0,0030 | 0,997 | 31,764 | 10,27 | 31,7 | 0,0030 | 31,7 |
| | 20 | 33 | 0,020 | 0,0040 | 0,996 | 31,796 | 12,57 | 38,8 | 0,0040 | 38,8 |
| | 25 | 40 | 0,025 | 0,0050 | 0,995 | 31,828 | 15,79 | 48,7 | 0,0050 | 48,7 |
| | 50 | 76 | 0,050 | 0,0100 | 0,990 | 31,989 | 32,35 | 99,2 | 0,0100 | 99,2 |
| | 75 | 102 | 0,075 | 0,0150 | 0,985 | 32,151 | 44,31 | 135,2 | 0,0150 | 135,2 |
| | 100 | 122 | 0,100 | 0,0200 | 0,980 | 32,315 | 53,51 | 162,4 | 0,0200 | 162,4 |
| | 125 | 145 | 0,125 | 0,0250 | 0,975 | 32,481 | 64,09 | 193,5 | 0,0250 | 193,5 |
| | 150 | 164 | 0,150 | 0,0300 | 0,970 | 32,648 | 72,83 | 218,8 | 0,0300 | 218,8 |
| | 175 | 176 | 0,175 | 0,0350 | 0,965 | 32,818 | 78,35 | 234,1 | 0,0350 | 234,1 |
| | 200 | 190 | 0,200 | 0,0400 | 0,960 | 32,989 | 84,79 | 252,1 | 0,0400 | 252,1 |
| | 225 | 202 | 0,225 | 0,0450 | 0,955 | 33,161 | 90,31 | 267,1 | 0,0450 | 267,1 |
| | 250 | 212 | 0,250 | 0,0500 | 0,950 | 33,336 | 94,91 | 279,2 | 0,0500 | 279,2 |
| | 275 | 215 | 0,275 | 0,0550 | 0,945 | 33,512 | 96,29 | 281,8 | 0,0550 | 281,8 |
| 2 | 240 | 0 | 0,240 | 0,0480 | 0,952 | 33,266 | 0,00 | 0,0 | 0,0480 | 0,0 |
| | 250 | 60 | 0,250 | 0,0500 | 0,950 | 33,336 | 24,99 | 73,5 | 0,0500 | 73,5 |
| | 275 | 172 | 0,275 | 0,0550 | 0,945 | 33,512 | 76,51 | 223,9 | 0,0550 | 223,9 |
| | 300 | 221 | 0,300 | 0,0600 | 0,940 | 33,690 | 99,05 | 288,3 | 0,0600 | 288,3 |
| | 325 | 233 | 0,325 | 0,0650 | 0,935 | 33,871 | 104,57 | 302,8 | 0,0650 | 302,8 |
| | 350 | 236 | 0,350 | 0,0700 | 0,930 | 34,053 | 105,95 | 305,1 | 0,0700 | 305,1 |
| 3 | 320 | 0 | 0,320 | 0,0640 | 0,936 | 33,834 | 0,00 | 0,0 | 0,0640 | 0,0 |
| | 325 | 60 | 0,325 | 0,0650 | 0,935 | 33,871 | 24,99 | 72,4 | 0,0650 | 72,4 |
| | 350 | 184 | 0,350 | 0,0700 | 0,930 | 34,053 | 82,03 | 236,2 | 0,0700 | 236,2 |
| | 375 | 238 | 0,375 | 0,0750 | 0,925 | 34,237 | 106,87 | 306,1 | 0,0750 | 306,1 |
| | 400 | 248 | 0,400 | 0,0800 | 0,920 | 34,423 | 111,47 | 317,6 | 0,0800 | 317,6 |
| | 425 | 253 | 0,425 | 0,0850 | 0,915 | 34,611 | 113,77 | 322,4 | 0,0850 | 322,4 |
| | 450 | 258 | 0,450 | 0,0900 | 0,910 | 34,801 | 116,07 | 327,1 | 0,0900 | 327,1 |
| | 475 | 264 | 0,475 | 0,0950 | 0,905 | 34,993 | 118,83 | 333,0 | 0,0950 | 333,0 |
| | 500 | 266 | 0,500 | 0,1000 | 0,900 | 35,188 | 119,75 | 333,7 | 0,1000 | 333,7 |
| | 525 | 262 | 0,525 | 0,1050 | 0,895 | 35,384 | 117,91 | 326,8 | 0,1050 | 326,8 |

Fuente: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio

De la tabla anterior se puede observar el esfuerzo desviador mayor que corresponde al tercer ciclo de cargas que tiene un valor de 333,7 kPa, el cual, posteriormente lo convertiremos a valores en psi, y para determinar el valor de deformación unitaria remanente, se tomará la diferencia entre la deformación unitaria final del segundo ciclo y la deformación unitaria inicial del tercer ciclo, ya que en este encontramos el valor de esfuerzo desviador mayor y en este intervalo entre segundo y tercer ciclo se mantuvo la recuperación de la deformación. En la siguiente figura se puede observar el comportamiento en la recuperación de la deformación al retirar la carga aplicada a la probeta.

Figura 43. Esfuerzo desviador (kPa) vs. Deformación unitaria



Fuente: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio

Los datos mostrados en la tabla anterior corresponden a la prueba realizada en la muestra # 3, y de igual manera se realizaron en las otras muestras. Los valores obtenidos en esta prueba fueron los siguientes:

Esfuerzo desviador..... $\sigma = 333,7 \text{ KPa} = 48\,3991 \text{ psi}$

Deformación unitaria remanente.... $\epsilon_r = 0,0700 - 0,0640 = 0,0060$

Módulo resiliente..... $M_r = \sigma/\epsilon_r = 48\,3991/0,006 = 8\,067 \text{ psi}$

4.3. Determinación del módulo de resiliencia de la subrasante mediante el valor de C.B.R.

En este medio, el valor del módulo de resiliencia se determina mediante la correlación que se hace con el porcentaje de C.B.R., esto se debe a que este ensayo es muy común y más fácil de realizar y menos costoso con respecto al ensayo de triaxial. Este valor se puede determinar mediante la utilización de formulas directas o correlación de Kentucky.

Fórmulas para determinar el M_r con el valor de C.B.R.

$M_r(\text{psi}) = 1\,500 * \text{CBR}$(para suelos finos con $\text{CBR} < 10\%$)

Donde el factor de 1 500 fue tomado del rango comprendido entre los valores de 750 y 3 000 que son los valores que se pueden utilizar en la fórmula para suelos finos. Por mucho tiempo estos valores han sido utilizados por investigadores y agencias de diseño de carreteras en los Estados Unidos.

$M_r(\text{psi}) = 4\,326 * \ln(\text{CBR}) + 241$ (para suelos granulares)

O también se pueden utilizar las siguientes fórmulas, que son las que actualmente se utilizan en Chile para diseño de pavimentos.

$$Mr(\text{MPa}) = 17,6 \cdot \text{CBR}^{0,64} \dots \dots \dots (\text{para suelos con } \text{CBR} < 12\%)$$

$$Mr(\text{MPa}) = 22,1 \cdot \text{CBR}^{0,55} \dots \dots \dots (\text{para suelos con } 12\% < \text{CBR} < 80\%)$$

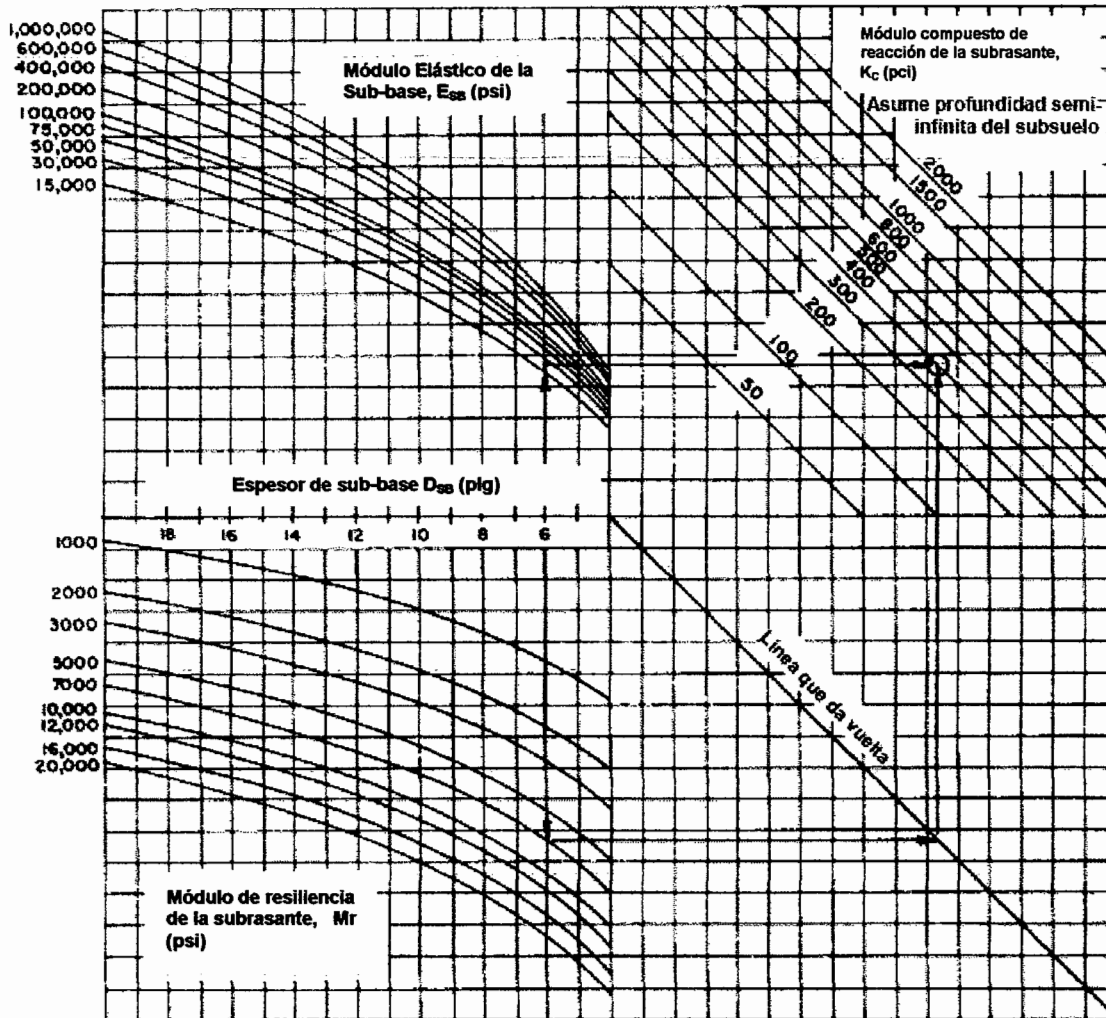
A pesar de que las fórmulas anteriores se encuentran bien fundamentadas, se recomienda utilizar la gráfica de correlación Kentucky mostrada en la figura 12 de este trabajo, ya que esta tiende a desfasar menos los valores de Mr conforme un material tiene mayor resistencia a la penetración.

4.4. Determinación del módulo de reacción de la subrasante mediante el valor de C.B.R.

El módulo de reacción K de la subrasante que se utiliza en el diseño de pavimentos rígidos, al igual que el módulo de resiliencia, se puede determinar mediante correlación con el valor de CBR utilizando la figura 11 de este trabajo.

Pero el valor que se debe utilizar, es el valor del módulo de reacción compuesto o corregido Kc, que se obtiene utilizando el nomograma de la figura 44, donde es tomado en cuenta el aporte estructural de capa de sub-base tipo granular, y asumiendo una profundidad semi-infinita del subsuelo, para lo cual se considera que existe una capa firme a más de 10 pies de profundidad bajo la subrasante.

Figura 44. Nomograma para determinar el módulo de compuesto K_c



Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

Ejemplo:

K: modulo de reacción..... 160 pci equivalente a $M_r = 7\ 000$ psi

H: espesor de la capa de sub-base asumido.....6"

E_{SB} : módulo elástico de la sub-base.....20 000 psi

K_c : módulo de reacción compuesto.....400 pci

También existe una relación entre los valores del módulo de reacción compuesto y el módulo de resiliencia para suelos de subrasante, esta relación está contemplada en la Guía para diseño de estructura de pavimento de la AASHTO de 1993.

$$K_c = M_r / 19,4$$

Donde:

K_c : módulo de reacción compuesto

M_r : módulo de resiliencia de la subrasante

4.5. Determinación de los factores del número estructural y espesores de las capas en pavimento flexible

Los factores que se tienen que encontrar para calcular y determinar los espesores de las diferentes capas que componen una estructura de pavimento flexible son los siguientes:

- a_1 número estructural de la carpeta asfáltica
- a_2 número estructural de la capa de base
- a_3 número estructural de la capa de sub-base

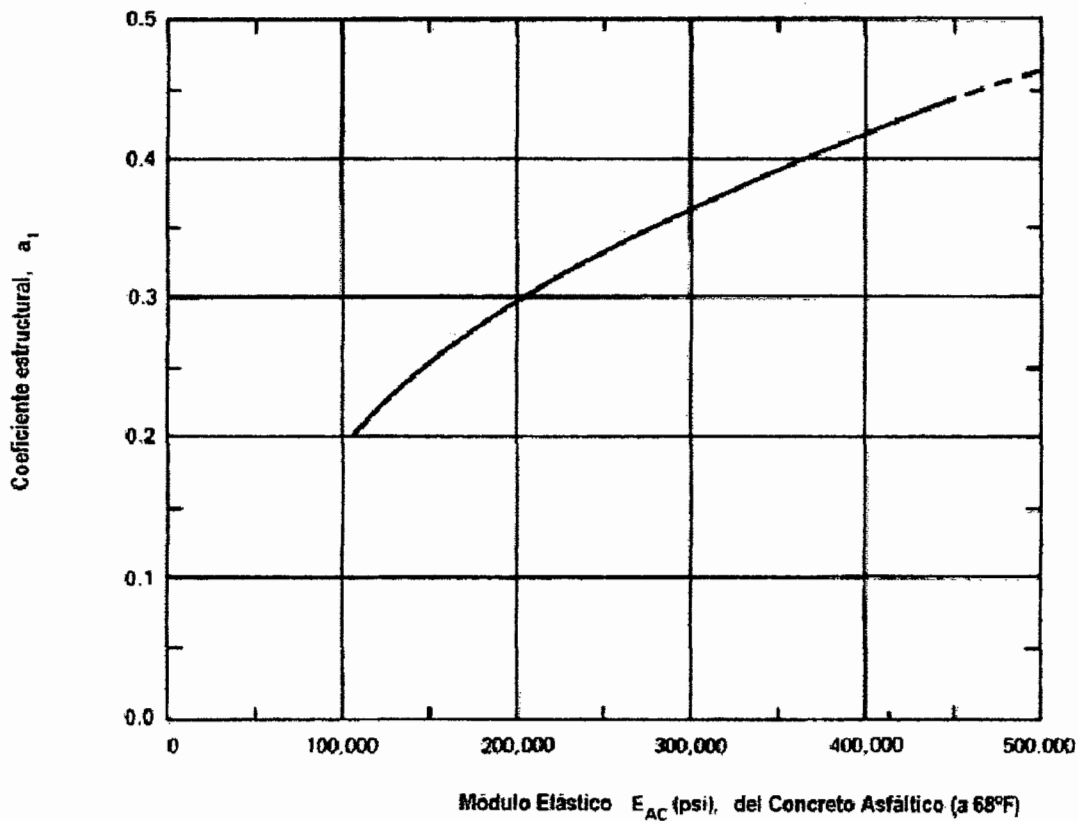
Los espesores a determinar son:

- D_1espesor de la carpeta de rodadura
- D_2espesor de la capa de base
- D_3espesor de la capa de sub-base

4.5.1. Número estructural de la carpeta asfáltica

Este factor representa la calidad de la carpeta asfáltica, otorgándole un valor respectivo en base al módulo de elasticidad de la mezcla de concreto asfáltico determinado a una temperatura de 68 °F. Dicha relación se puede determinar mediante la siguiente gráfica.

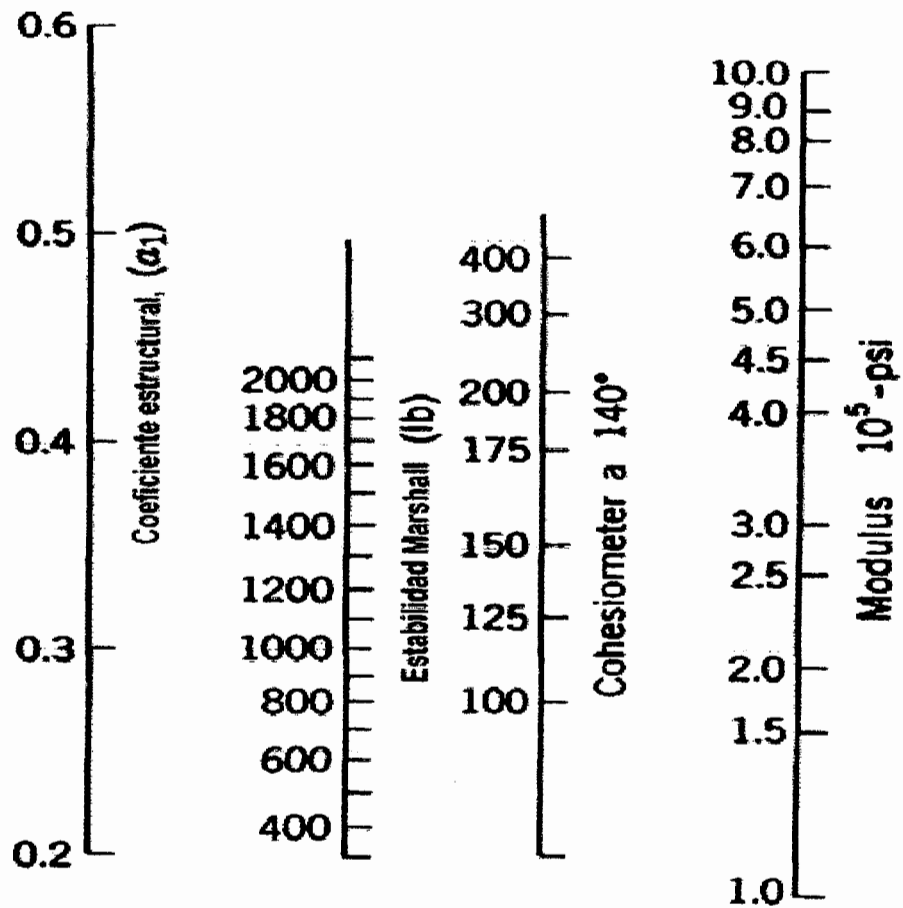
Figura 45. Coeficiente estructural a_1 vs Módulo elástico del asfalto



Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

Tomando en cuenta que este tipo de ensayo no es muy común en el medio, este valor también puede ser determinado mediante una relación que existe con el ensayo de estabilidad del concreto asfáltico mediante el Método Marshall expresado en libras. Este valor se puede determinar utilizando el nomograma de la figura 46.

Figura 46. Nomograma para determinar el coeficiente estructural a_1

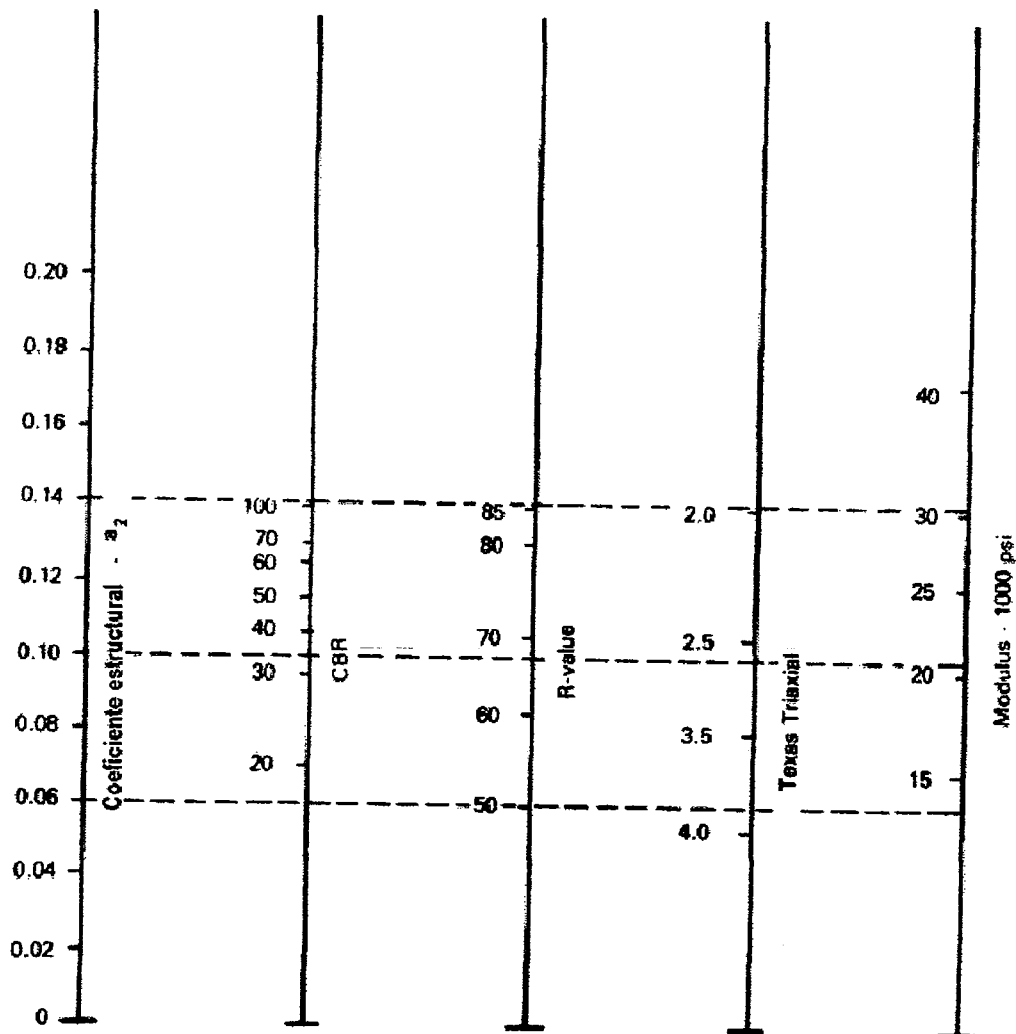


Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

4.5.2. Número estructural de la capa de base

El número estructural de la capa de base representa la calidad de los materiales que la conforman, en donde dicho valor está relacionado con valores obtenidos en diferentes tipos de pruebas, pero realizadas a capas de base granular.

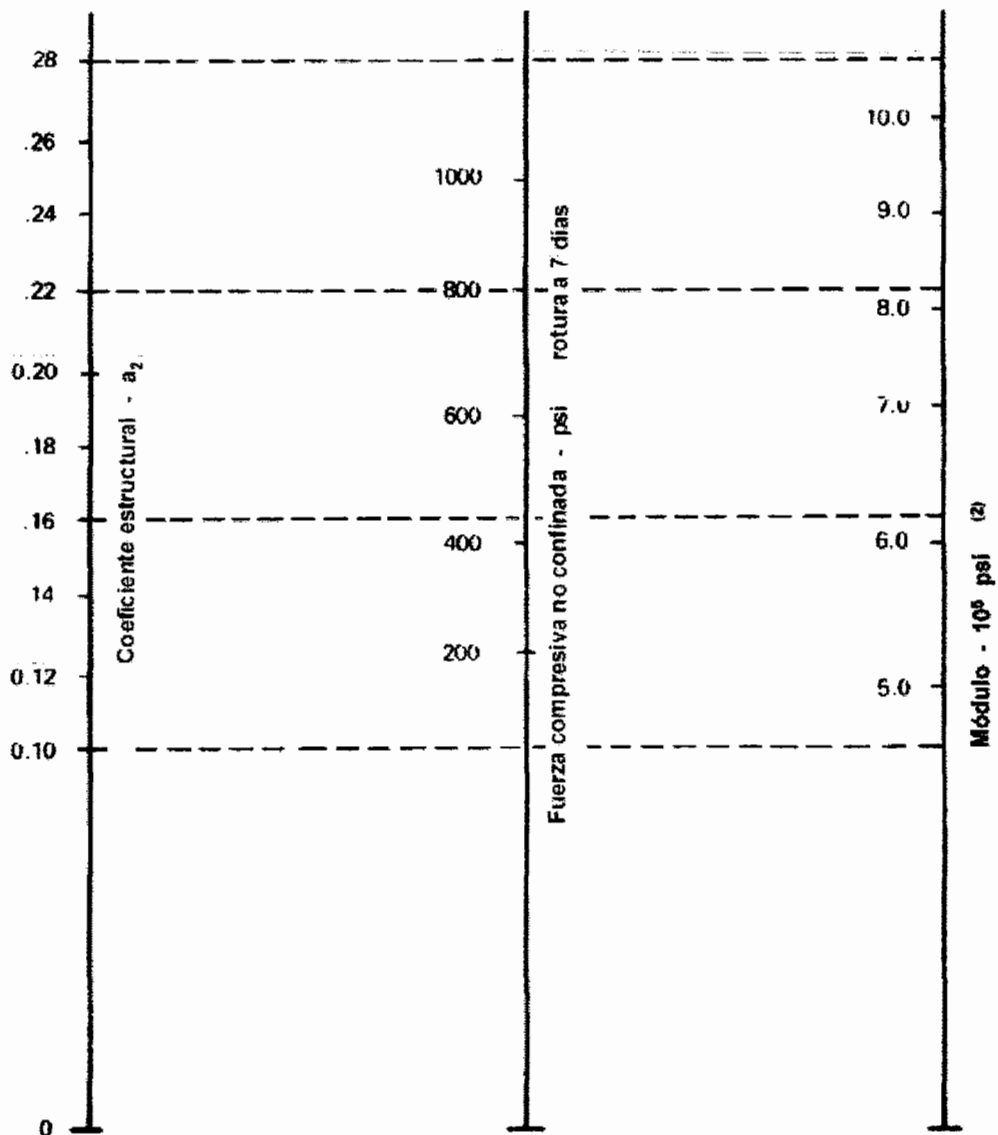
Figura 47. Nomograma 1 para determinar el coeficiente estructural a_2



Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

En algunas ocasiones se colocan en la estructura de pavimento, bases estabilizadas con cemento, y para este tipo de bases existe una relación entre el número estructural de capa con su esfuerzo a compresión determinado a una edad de 7 días, como muestra la siguiente figura.

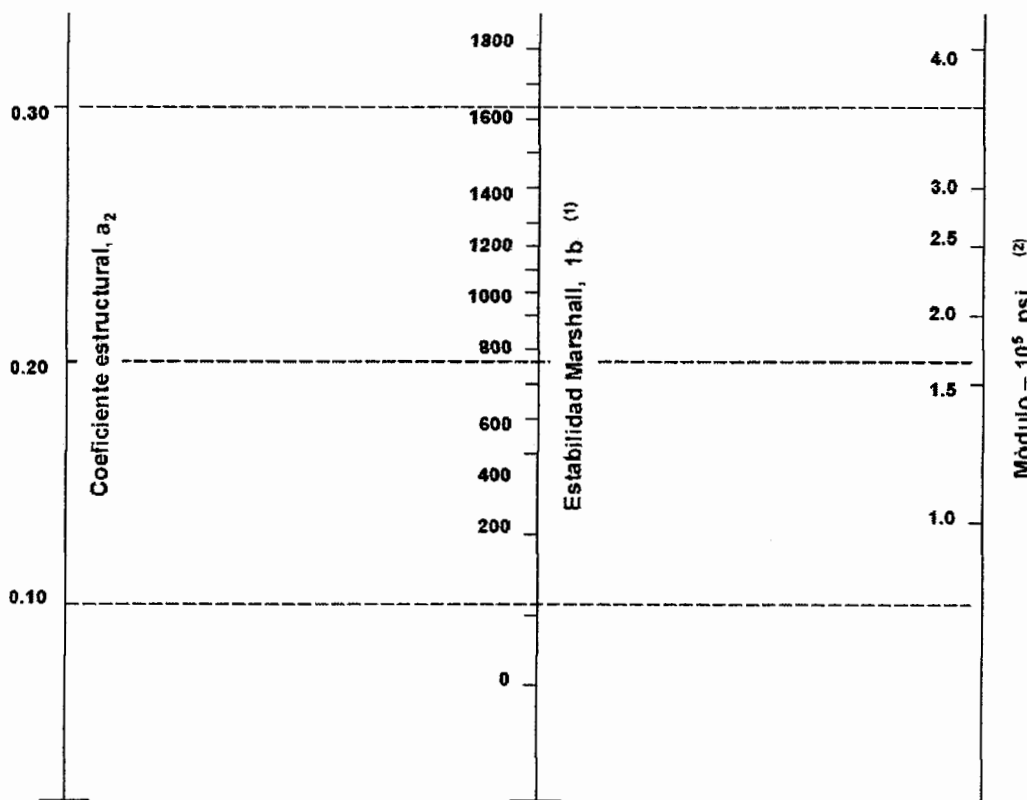
Figura 48. Nomograma 2 para determinar el coeficiente estructural a_2



Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

También se tienen bases que han sido tratadas con bitumen, como por ejemplo algunos tipos de bases negras para las cuales existe una relación especial entre el valor del número estructural y su estabilidad en Método Marshall, como se aprecia en el nomograma de la figura siguiente.

Figura 49. Nomograma 3 para determinar el coeficiente estructural a_2

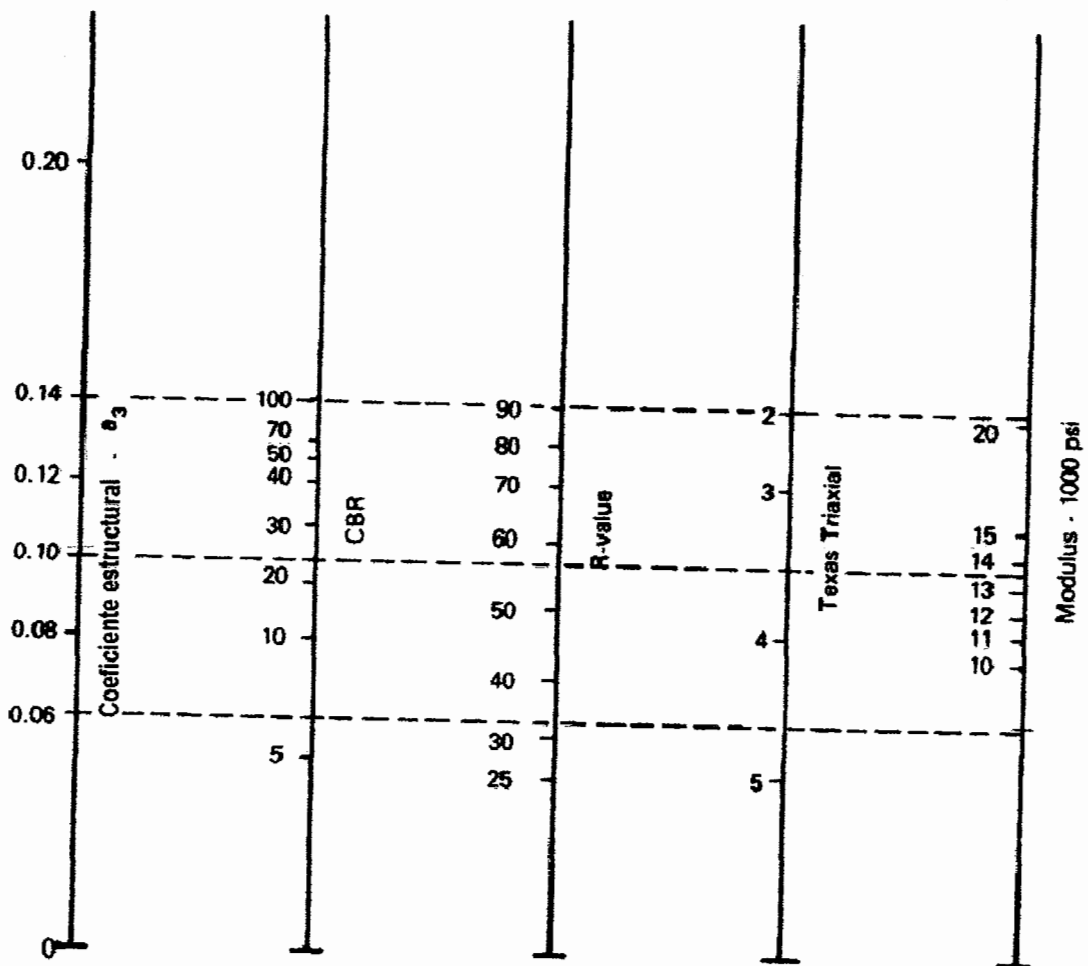


Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

4.5.3. Número estructural de la capa de sub-base

El valor del número estructural de la capa de sub-base corresponde a la calidad de los materiales que la conforman, en donde dicho valor está relacionado con valores obtenidos en diferentes tipos de pruebas realizadas a capas de sub-base granular.

Figura 50. Nomograma para determinar el coeficiente estructural a_3



Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

4.5.4. Determinación de los espesores de cada capa

Para determinar los espesores se deben tener los coeficientes estructurales de cada capa que ya se vieron anteriormente como determinarlos, así también los coeficientes de drenaje que se observó como determinarlos en el inciso 2.1.5.1 del capítulo 2.

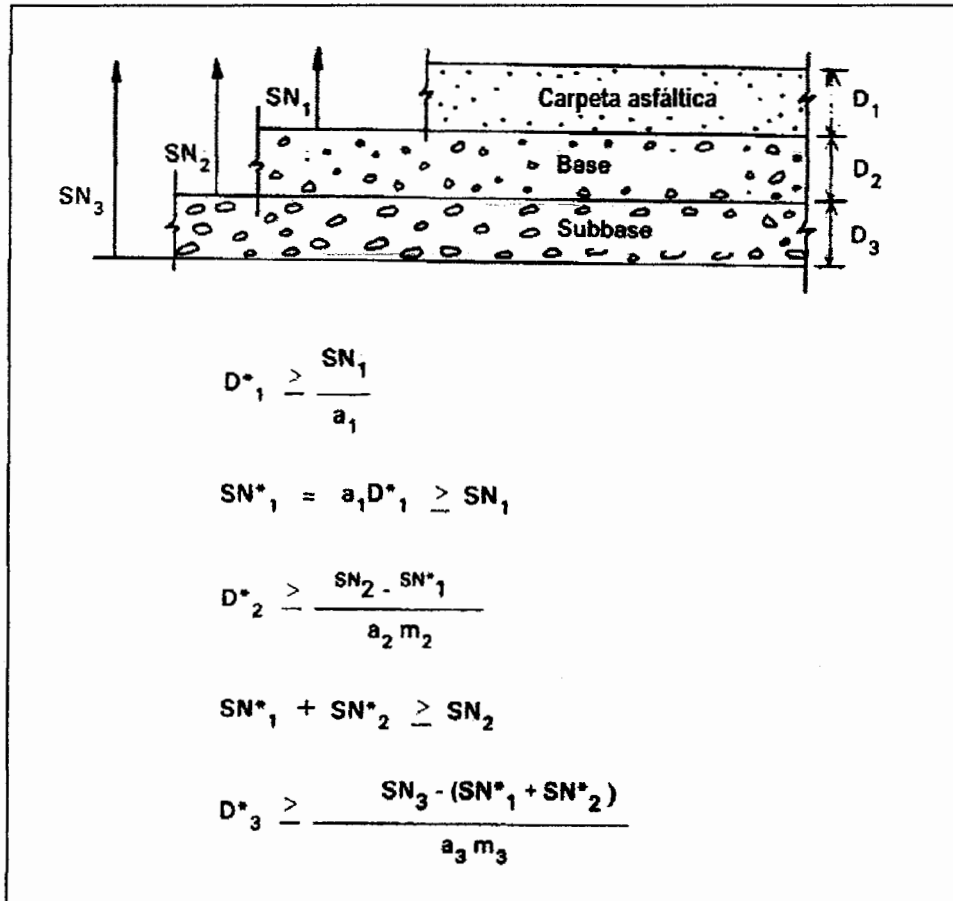
Al momento de resolver la ecuación de diseño para pavimento flexible, se encontrará un número estructural calculado "SN", el cual debe de ser igual que el número estructural asumido para los Factores Equivalentes de Carga "LEF's". Si la diferencia es mayor a 1, entonces proceda iterativamente hasta lograr que SN (calculado) = SN (asumido), o hasta que la diferencia sea menor a uno.

Ecuación de diseño

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07$$

Después, utilizar el procedimiento de la figura 51 para determinar los espesores requeridos de acuerdo al SN encontrado.

Figura 51. Secuencia de espesores requeridos



Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, 1993.

Para determinar el espesor de la carpeta asfáltica D_1 , se asume que toda la resistencia para soportar las repeticiones pronosticadas, la brinda la carpeta asfáltica.

Se resuelve la ecuación de diseño colocando en lugar del Mr de la subrasante el valor del E_{BS} obtenido por ensayo directo o por correlación con otra prueba de resistencia como el $\bar{C}BR$. Al resolver la ecuación de diseño se obtiene un $SN = SN_1$.

$$SN_1 = a_1 D_1$$

$$D_1^* \geq SN_1 / a_1$$

Se redondea el valor de \bar{D}_1 a un entero de pulgada o media pulgada, donde este será el valor D_1^* .

Figura 52. Resolviendo ecuación para SN_1

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} E_{BS} - 8,07$$

Para determinar el espesor de la capa de base D_2 , se asume que toda la resistencia la brinda la carpeta asfáltica y la capa de base, de manera que:

$$SN_2 = SN_1 + a_2 D_2 m_2$$

Donde el valor de SN_2 se determina con la ecuación de diseño colocando en lugar del Mr el valor del módulo de elasticidad de la capa de sub-base E_{SB} , este valor es obtenido por ensayo directo o por correlación con una prueba de resistencia como el CBR. Con esto se obtiene $SN = SN_2$.

$$D_2^* \geq (SN_2 - SN_1^*) / (a_2 m_2)$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

Figura 53. Resolviendo ecuación para SN_2

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN_2 + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} E_{SB} - 8,07$$

Para determinar el espesor de la capa de sub-base, se asume que toda la resistencia la brinda la carpeta asfáltica más la capa de base y más la capa de sub-base, pero esto ya se realizó cuando se usó el módulo de resiliencia de la subrasante M_r para calcular el SN que se convertirá en SN_3 . Figura 54.

$$SN_3 = SN_1 + SN_2 + a_3 D_3 m_3$$

$$D_3^* \geq (SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)) / (a_3 m_3)$$

Figura 54. Resolviendo ecuación para SN_3

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN_3 + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN_3 + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07$$

5. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LABORATORIO

5.1. Procedimiento y secuencia de los cálculos en laboratorio

Este procedimiento se refiere a los pasos a seguir en laboratorio para encontrar los datos que servirán en el diseño de cada uno de los diferentes tipos de pavimento. Después de haber realizado los ensayos de laboratorio, se procede a crear una tabla resumiendo los resultados de cada ensayo, y así, poder tomar la decisión de cuáles datos se tomarán en cuenta para el proceso de cálculo.

Tabla XXXVI. Resumen de resultados de pruebas de laboratorio

| TABLA DE RESULTADOS DE ENSAYOS | | | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|------------------------|------------------|-----------------|---------------|--------------|
| # DE MUESTRA | PROCTOR | C.B.R. | LIMITES | GRANULOMETRÍA | Mr por TRIAXIAL | Mr por C.B.R. | K por C.B.R. |
| # 1 | PUS = 90.0 Lb/pie ³ Hum. Op. = 27,5% | 13,1% | LL = 47,1 IP = 10,2 | Pasa 200 = 74,8% | 10 559 psi | 11 200 psi | 215 pci |
| # 2 | PUS = 94.6 Lb/pie ³ Hum. Op. = 24,2% | 20,7% | LL = 51,1 IP = 11,3 | Pasa 200 = 48,2% | 14 267 psi | 15 500 psi | 255 pci |
| # 3 | PUS = 91.3 Lb/pie ³ Hum. Op. = 30,0% | 8,8% | LL = 42,3 IP = 9,5 | Pasa 200 = 60,3% | 8 067 psi | 8 800 psi | 185 pci |
| # 4 | PUS = 95.4 Lb/pie ³ Hum. Op. = 25,3% | 5,6% | LL = 43,0 IP = 11,3 | Pasa 200 = 78,6% | 5 910 psi | 6 300 psi | 155 pci |

Fuente: Datos obtenidos en pruebas de laboratorio

Como se observa en la tabla XXXVI, se tienen diferentes valores de módulo de resiliencia M_r y diferentes módulos de reacción K para las diferentes muestras que se encontraron en el tramo, teniéndose que hacer un promedio con los diferentes valores obtenidos, o bien, si estos difieren demasiado uno con respecto a los demás y los tramos son bastante grandes, se realizará un diseño por separado para cada uno de los diferentes tramos, lo cual queda a disposición muy particular del o los diseñadores.

Para efecto de este trabajo se consideró el promedio de los valores encontrados en las muestras 1, 3 y 4, ya que los valores de la muestra número 2 difiere altamente con los demás valores.

$$M_r \text{ promedio} = (11\,200 + 8\,800 + 6\,300) / 3 = 8\,767 \text{ psi}$$

$$K \text{ promedio} = (215 + 185 + 155) / 3 = 185 \text{ pci}$$

Los valores promedio anteriores son los valores de K y M_r que se utilizarán para cada una de las ecuaciones en los diseños de pavimento (rígido y flexible), siempre recordando que para el valor de K se debe encontrar el valor de K_c (módulo de reacción compuesto).

También, en los dos ejemplos de diseño, se empleará el mismo estudio de tráfico promedio diario anual (TPDA) mostrado en la tabla XXXVII.

Tabla XXXVII. Tráfico promedio diario anual y tasa de crecimiento anual

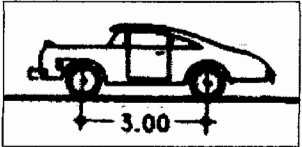
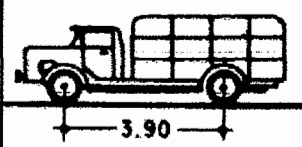
| TPDA | | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------|
| TIPO DE VEHICULO | CARGA EN EJE DIRECCIONAL | CARGA EN EJE DE TRACCIÓN | CARGA EN EJE DE ARRASTRE | CARGA TOTAL | NUMERO DE VEHICULOS | TASA DE CRECIMIENTO ANUAL "g" |
| Ap | 1 000 kg | 1 000 kg | ---- | 2 000 kg | 650 | 4% |
| Ac | 2 000 kg | 3 000 kg | ---- | 5 000 kg | 420 | 3% |
| C2 | 5 000kg | 10 000kg | ---- | 15 000 kg | 165 | 4% |
| C3 | 5 000kg | 16 000 kg | ---- | 21 000 kg | 102 | 3% |
| T2 - S1 | 5 000kg | 9 000 kg | 9 000 kg | 23 000 kg | 34 | 2% |
| T2 - S2 | 5 000kg | 9 000 kg | 16 000 kg | 30 000 kg | 51 | 2% |
| T3 - S2 | 5 000kg | 16 000 kg | 16 000 kg | 37 000 kg | 156 | 3% |

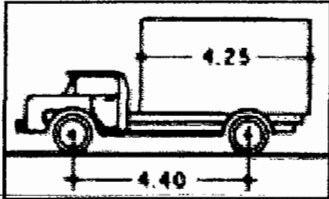
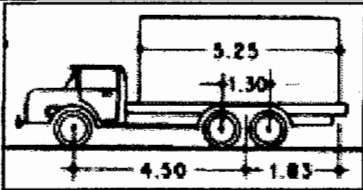
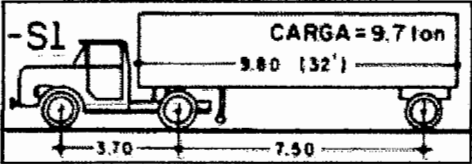
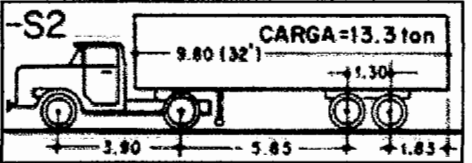
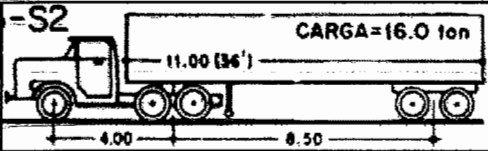
Fuente: Datos asumidos para los ejemplos

En el ejemplo de la tabla anterior, se puede observar que la tasa de crecimiento anual difiere para cada tipo de vehículo, pero en Guatemala la Dirección General de Caminos (DGC), utiliza una tasa de crecimiento vehicular de 3% para rutas departamentales sin historial de tráfico.

Los tipos de vehículos utilizados son los que se muestran en la tabla XXXVIII.

Tabla XXXVIII. Tipos de vehículos utilizados para TPDA

| Figura del vehículo | Tipo | Descripción de Ejes |
|---|------|---------------------|
|  | Ap | Dos ejes sencillos |
|  | Ac | Dos ejes sencillos |

| | | |
|---|----------------|--------------------------------|
|  | C2 | Dos ejes sencillos |
|  | C3 | Un eje sencillo y uno doble |
|  | T2 - S1 | Tres ejes sencillos |
|  | T2 - S2 | Dos ejes sencillos y uno doble |
|  | T3 - S2 | Un eje sencillo y dos dobles |

También, previamente se hace el estudio de la geometría de las capas de base y sub-base, así como, la información sobre los materiales que compondrán cada una de las capas.

Para efectos de cálculos en este trabajo, se asumirán los datos sobre la geometría y los materiales de las capas de base y sub-base, las cuales se compondrán de la siguiente manera:

- a) Para la capa de base, se considera un ancho de terracería de 12 metros, de acuerdo al estudio de tráfico promedio diario, esta sería una carretera tipo B.

Datos de geometría:

Pendiente longitudinal (\bar{S}) = 2%

Pendiente transversal (S_x) = 3%

Espesor de capa de base (h) = 200 mm (0,200 m)

Ancho de capa de base (b) = 12 m

Calcular:

Longitud resultante de la base (L_r)

$$L_r = (12) * ((2 / 3)^2 + 1)^{0,5} = 14,42 \text{ m}$$

Pendiente transversal resultantes (\bar{S}_r)

$$S_r = ((0,02)^2 + (0,03)^2)^{0,5} = 0,036$$

Factor de pendiente longitudinal (\bar{S}_l)

$$S_l = (14,42 * 0,036) / 0,200 = 2,60$$

Factor de tiempo (\bar{T}_{50})

$$T_{50} = 0,130 \text{ (determinado por medio de la figura 16)}$$

Datos del material:

Volumen de vacios (V_v) = $N_{emax} = 0,28$

Densidad seca (σ_d) = 118,0 lb/pie³

Granulometría

Tabla XXXIX. Ejemplo de granulometría para base granular tipo B-1

| Tamiz | Abertura | %Pasa | Parámetros |
|---------|-----------|-------|------------|
| 1 ½" | 37,500 mm | 100,0 | 100 – 100 |
| ¾" | 19,000 mm | 80,0 | 60 – 90 |
| No. 4 | 4,760 mm | 40,0 | 30 – 60 |
| No. 200 | 0,075 mm | 3,5 | 5 – 15 |

Calcular:

Diámetro efectivo (D_{10})

$D_{10} = 0,117$ (determinado en base a la granulometría)

Pérdida de agua por gravedad (C)

$C = 60$ (determinado por medio de la tabla XXIV, con 60% de grava)

Porosidad (N)

$N = (1 - (118,0 / (62,4 * 2,70))) = 0,30$

Permeabilidad (k)

$k = ((6,214 \times 10^5) * (0,117)^{1,476} * (0,30)^{6,654}) / (3,5 / 100)^{0,597} = 64,3$ pies/día

$k = 16,92$ m/día

Porosidad efectiva (N_c)

$N_c = (0,28 * 60) / 100 = 0,168$

Factor de drenaje (m_x)

$m_x = (0,168 * (14,42)^2) / (0,200 * 16,92) = 10,32$

Tiempo de drenaje en horas (t)

$$t = 0,130 * 10,32 * 24 = 32,20 \text{ horas (1 día + 8 horas + 12 minutos)}$$

R_r Podemos deducir que la calidad de drenaje es buena.

b) Para la capa de sub-base, se considera un ancho de terracería de 13 metros, un metro más que la capa de base por estar debajo de esta, y de acuerdo con el estudio de tráfico promedio diario, esta sería una carretera tipo B

Datos de geometría:

Pendiente longitudinal (\bar{S}) = 2%

Pendiente transversal (S_x) = 3%

Espesor de capa de base (h) = 200 mm (0,200 m)

Ancho de capa de base (b) = 13 m

Calcular:

Longitud resultante de la base (L_r)

$$L_r = (13) * ((2 / 3)^2 + 1)^{0,5} = 15,62 \text{ m}$$

Pendiente transversal resultantes (\bar{S}_r)

$$S_r = ((0,02)^2 + (0,03)^2)^{0,5} = 0,036$$

Factor de pendiente longitudinal (\bar{S}_l)

$$S_l = (15,62 * 0,036) / 0,200 = 2,81$$

Factor de tiempo (\bar{T}_{50})

$$T_{50} = 0,120 \text{ (determinado por medio de la figura 16)}$$

Datos del material:

$$\text{Volumen de vacios } (V_V) = N_{\text{emax}} = 0,33$$

$$\text{Densidad seca } (\sigma_d) = 114,0 \text{ lb/pie}^3$$

Granulometría

Tabla XL. Ejemplo de granulometría para sub-base granular tipo B-1

| Tamiz | Abertura | %Pasa | Parámetros |
|---------|-----------|-------|------------|
| 1 1/2" | 37,500 mm | 100,0 | 100 – 100 |
| 3/4" | 19,000 mm | 85,0 | 60 – 90 |
| No. 4 | 4,760 mm | 49,0 | 30 – 60 |
| No. 200 | 0,075 mm | 9,0 | 5 – 15 |

Calcular:

Diámetro efectivo (D_{10})

$$D_{10} = 0,085 \text{ (determinado en base a la granulometría)}$$

Pérdida de agua por gravedad (C)

$$C = 40 \text{ (determinado por medio de la tabla XXIV, con 51\% de grava)}$$

Porosidad (N)

$$N = (1 - (114,0 / (62,4 * 2,70))) = 0,32$$

Permeabilidad (k)

$$k = ((6,214 \times 10^5) * (0,085)^{1,476} * (0,32)^{6,654}) / (9,0 / 100)^{0,597} = 35,1 \text{ pies/día}$$

$$k = 10,70 \text{ m/día}$$

Porosidad efectiva (N_c)

$$N_c = (0,33 * 40) / 100 = 0,132$$

Factor de drenaje (m_x)

$$m_x = (0,132 * (15,622)^2) / (0,200 * 10,70) = 15,05$$

Tiempo de drenaje en horas (t)

$$t = 0,120 * 15,05 * 24 = 43,34 \text{ horas (1 día + 19 horas + 20 minutos)}$$

R, Podemos deducir que la calidad de drenaje es de regular a buena.

Y para complementar, se calcula el porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación (P).

Datos:

Días de traslape entre época de lluvia y seca (S_t) = 15 días

Días con lluvia en que el pavimento puede drenar hasta el 85% del estado de saturación en 24 horas o menos (R) = 100 días

Calcular:

$$P = 100 * (15 + (100 * 0,70)) / 365 = 23,3\%$$

Utilizando un R igual a 100 días de acuerdo con las líneas de isocronas costeras tomadas de la figura 13, tomando un 70% de esos días con las condiciones que el valor de R requiere.

5.2. Ejemplo para diseño de estructura de pavimento flexible

Para el ejemplo de diseño de pavimento flexible, primero se procede a determinar todos los parámetros que influyen en la ecuación, y posteriormente a la solución de la misma para calcular y determinar los espesores de cada capa que componen la estructura.

5.2.1. Determinación de los parámetros para la solución de pavimento flexible

Primer paso:

Determinar los valores de serviciabilidad inicial y final que se utilizarán, así como el periodo de diseño de la estructura.

$$P_o = 4,2$$

$$P_t = 2,0$$

$$N = 20 \text{ años}$$

Segundo paso:

Determinar el número de ejes equivalentes a 18 kips, para lo cual se asumirá un valor de número estructural inicial para calcular los factores de camión. $SN = 3$ para la primera iteración.

La siguiente tabla muestra cómo se calculan los factores de camión utilizando la información del tráfico vehicular y de las tablas de los factores equivalentes de carga (tablas de la A-1 a la A-18 del apéndice).

Tabla XLI. Factor de camión 1

| COMPOSICIÓN DEL FACTOR DE CAMIÓN | | | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| TIPO DE VEHÍCULO | CARGA EN EJE DIRECCIONAL | CARGA EN EJE DE TRACCIÓN | CARGA EN EJE DE ARRASTRE | FACTOR POR EJE DIRECCIONAL | FACTOR POR EJE DE TRACCIÓN | FACTOR POR EJE DE ARRASTRE | FACTOR DE CAMIÓN |
| | kips | kips | kips | | | | |
| Ap | 2 | 2 | ----- | 0,0002 | 0,0002 | ----- | 0,0004 |
| Ac | 4 | 6 | ----- | 0,0020 | 0,0110 | ----- | 0,0130 |
| C2 | 10 | 20 | ----- | 0,0900 | 1,5600 | ----- | 1,6500 |
| C3 | 10 | 32 | ----- | 0,0900 | 0,8430 | ----- | 0,9330 |
| T2 - S1 | 10 | 18 | 18 | 0,0900 | 1,0000 | 1,0000 | 2,0900 |
| T2 - S2 | 10 | 18 | 32 | 0,0900 | 1,0000 | 0,8430 | 1,9330 |
| T3 - S2 | 10 | 32 | 32 | 0,0900 | 0,8430 | 0,8430 | 1,7760 |
| Factores para: n = 20 años ; Pt = 2,0 ; SN asumido = 3 ; donde la AASHTO fija 1 000 kg = 2 kips | | | | | | | |

Seguidamente se construye otra tabla para el cálculo del ESAL's para el carril de diseño con los factores de dirección y carril incluidos.

Tabla XLII. Hoja de trabajo para calcular el ESAL's en el carril de diseño 1

| HOJA DE TRABAJO PARA ESAL's | | | | | |
|---|----------------------------|--|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| TIPO DE VEHÍCULO | NÚMERO DE VEHICULOS | FACTOR DE CRECIMIENTO | TRÁNSITO DE DISEÑO | FACTOR DE CAMIÓN | ESAL's POR VEHICULOS |
| Ap | 650 | 29,78 | 7065305 | 0,0004 | 2826 |
| Ac | 420 | 26,87 | 4119171 | 0,0130 | 53549 |
| C2 | 165 | 29,78 | 1793501 | 1,6500 | 2959276 |
| C3 | 102 | 26,87 | 1000370 | 0,9330 | 933345 |
| T2 - S1 | 34 | 24,30 | 301563 | 2,0900 | 630267 |
| T2 - S2 | 51 | 24,30 | 452345 | 1,9330 | 874382 |
| T3 - S2 | 156 | 26,87 | 1529978 | 1,7760 | 2717241 |
| Σ vehículos = | 1578 | | ESAL's DE DISEÑO = | | 8170886 |
| F_D = | 0,5 | Cálculos para un SN = 3 asumido | | | |
| F_L = | 0,9 | | | | |
| ESAL's DE CARRIL DE DISEÑO = ESAL's * F_D * F_L = W₁₈ = | | | | 3676899 | |

Tercer paso:

Consiste en determinar todos los valores relacionados con la confiabilidad que le se dará a la estructura de pavimento.

Confiabilidad (R) = 50 (para tránsito $< 5 \times 10^6$ de ejes, ver tabla XXIX)

Desviación estándar (S) = 0,40 (recomendado para pavimento flexible)

Factor de seguridad (FS) = 1,00 (para R igual a 50)

Desviación normal estándar en función de R (Z_r) = -0,000

Cuarto paso:

Determinar los coeficientes de drenaje y los coeficientes estructurales de capa para calcular cada uno de los espesores reales de la carpeta de rodadura, base y sub-base.

Con los datos encontrados de calidad de drenaje y porcentaje del tiempo de humedad cercano a saturación, se obtiene:

$m_2 = 1,15$ (Calidad de drenaje = buena y $P = 23,3$, ver tabla XXII)

$m_3 = 1,00$ (Calidad de drenaje = regular y $P = 23,3$, ver tabla XXII)

Y para los coeficientes estructurales de capa y los valores de módulo de elasticidad se asumirán valores mínimos de CBR para base y sub-base granular, según especificaciones de libro azul de caminos (ver tablas XI y XII), y también un valor medio de estabilidad para la capa de asfalto por el método Marshall.

$a_1 = 0,40$ (para una estabilidad = 1 700 lbs, ver figura 46)

$a_2 = 0,13$ (para un CBR = 70%, $E_{BS} = 27\ 500$ psi, ver figura 47)

$a_3 = 0,12$ (para un CBR = 40%, $E_{SB} = 16\ 300$ psi, ver figura 50)

5.2.2. Solución de la ecuación para pavimento flexible

Para la solución de la ecuación, se utilizará una hoja de cálculo, con la cual se podrá considerar todos los decimales para obtener un dato más exacto.

Al sustituir todos los parámetros en la ecuación para $M_r = 8\ 767$ psi

Figura 55. Resolviendo ecuación en el ejemplo para SN

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07$$

Se obtiene un $SN = 3,14$ (OK)

Valor considerado correcto, y se prosigue con el cálculo, pero si se hubiese obtenido un valor de $SN \geq 4$, se tendría que hacer otra iteración y cambiar los factores de carga hasta que la diferencia entre SN calculado y SN asumido fuera menor a 1.

Ahora se resolverá para SN_1 , sustituyendo a M_r por $E_{BS} = 27\ 500$ psi

Figura 56. Resolviendo ecuación en el ejemplo para SN_1

$$\log_{10}(ESAL) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN_1 + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN_1 + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} E_{BS} - 8,07$$

Obtenido un $\overline{SN}_1 = 2,07 = a_1 \overline{D}_1$

$\overline{D}_1^* \geq \overline{SN}_1 / a_1 = 2,07 / 0,40 = 5,18''$

$\overline{D}_1^* = 5,5''$

$\overline{SN}_1^* = a_1 \overline{D}_1^* \geq \overline{SN}_1$

$\overline{SN}_1^* = 0,40 \times 5,5 = 2,20$

Ahora resolver para \overline{SN}_2 , sustituyendo \overline{Mr} por $\overline{E}_{SB} = 16\ 300$ psi

Figura 57. Resolviendo ecuación en el ejemplo para \overline{SN}_2

$$\log_{10}(\overline{ESAL}) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(\overline{SN}_2 + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(\overline{SN}_2 + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} \overline{E}_{SB} - 8,07$$

Se obtiene un $\overline{SN}_2 = 2,51 = \overline{SN}_1 + a_2 \overline{D}_2 m_2$

$\overline{D}_2^* \geq (\overline{SN}_2 - \overline{SN}_1^*) / a_2 m_2 = (2,51 - 2,20) / (0,13 * 1,15) = 2,07''$

$\overline{D}_2^* = 2,5''$

$\overline{SN}_2^* = a_2 \overline{D}_2^* m_2 = (0,13 * 2,5 * 1,15) = 0,37$

$\overline{SN}_1^* + \overline{SN}_2^* \geq \overline{SN}_2$

$\overline{SN}_2^* \geq \overline{SN}_2 - \overline{SN}_1^* = 2,51 - 2,20 = 0,31$

Ya resuelto para \overline{Mr} , entonces, $\overline{SN} = \overline{SN}_3 = 3,14$

Se tiene $\overline{SN}_3 = \overline{SN}_1 + \overline{SN}_2 + a_3 \overline{D}_3 m_3$

$\overline{D}_3 \geq (\overline{SN}_3 - (\overline{SN}_1^* + \overline{SN}_2^*)) / a_3 m_3$

$\overline{D}_3 \geq (3,14 - (2,20 + 0,31)) / (0,12 * 1,00) = 5,25''$

$\overline{D}_3 = 5,5''$

Por lo tanto $\overline{SN} = a_1 \overline{D}_1 + a_2 \overline{D}_2 m_2 + a_3 \overline{D}_3 m_3$

$\overline{SN}_{\text{recalculado}} = (0,40 * 5,5) + (0,13 * 1,15 * 2,5) + (0,12 * 1,00 * 5,5) = 3,23$

Quedando un espesor muy alto de carpeta asfáltica, y eso sería antieconómico, por lo tanto, haremos otra propuesta con los valores mínimos de espesores para la carpeta de asfalto.

Se tomará el mínimo para un número de ESAL's de diseño que oscila entre 2×10^6 y 7×10^6 . Tabla XXXIV.

$$\bar{D}_1^* = 3,5''$$

$$\bar{SN}_1^* = a_1 \bar{D}_1 = (0,40 \cdot 3,5) = 1,40$$

$$\bar{SN}_2 = 2,51 \text{ (no sufre ningún cambio)}$$

$$\bar{D}_2^* \geq (\bar{SN}_2 - \bar{SN}_1^*) / a_2 m_2 = (2,51 - 1,40) / (0,13 \cdot 1,15) = 7,42''$$

$$\bar{D}_2^* = 7,5''$$

$$\bar{SN}_2^* = a_2 \bar{D}_2^* m_2 = (0,13 \cdot 7,5 \cdot 1,15) = 1,12$$

$$\bar{SN}_1^* + \bar{SN}_2^* \geq \bar{SN}_2$$

$$\bar{SN}_2^* \geq \bar{SN}_2 - \bar{SN}_1^* = 2,51 - 1,40 = 1,11$$

$$\bar{SN}_3 = 3,14$$

$$\text{Se obtiene } \bar{SN}_3 = \bar{SN}_1 + \bar{SN}_2 + a_3 \bar{D}_3 m_3$$

$$\bar{D}_3 \geq (\bar{SN}_3 - (\bar{SN}_1^* + \bar{SN}_2^*)) / a_3 m_3$$

$$\bar{D}_3 \geq (3,14 - (1,40 + 1,12)) / (0,12 \cdot 1,00) = 5,16''$$

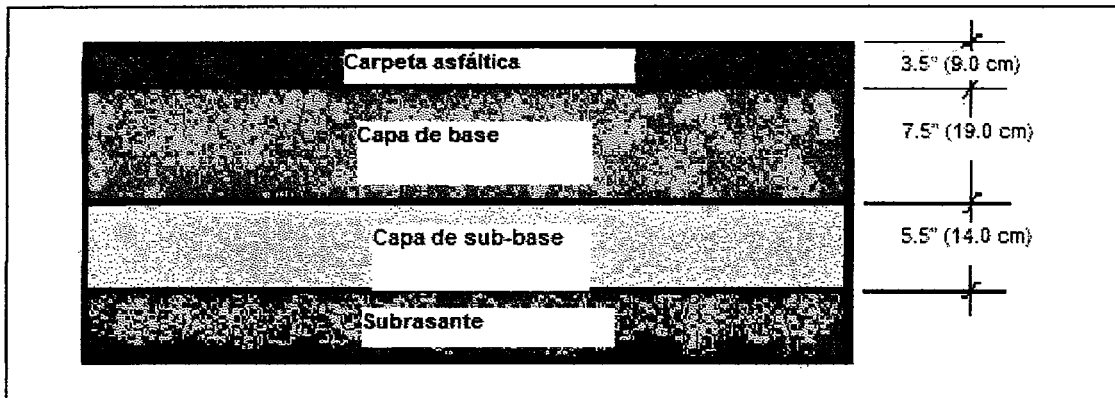
$$\bar{D}_3 = 5,5''$$

$$\text{Por lo tanto } \bar{SN} = a_1 \bar{D}_1 + a_2 \bar{D}_2 m_2 + a_3 \bar{D}_3 m_3$$

$$\bar{SN}_{\text{recalculado}} = (0,40 \cdot 3,5) + (0,13 \cdot 1,15 \cdot 7,5) + (0,12 \cdot 1,00 \cdot 5,5) = 3,18 \quad (\text{OK})$$

Y al final, la estructura de pavimento flexible quedaría de la forma en que se muestra en la figura 58.

Figura 58. Esquema de la estructura final de pavimento flexible



5.3. Ejemplo para diseño de estructura de pavimento rígido

Para el ejemplo de diseño de pavimento rígido, al igual que para pavimento flexible, primero se determinarán todos los parámetros que influyen en la ecuación, y posteriormente a la solución de la misma para calcular y determinar el espesor de losa real.

5.3.1. Determinación de los parámetros para la solución de pavimento rígido

Primer paso:

Determinar los valores de serviciabilidad inicial y final que se utilizarán, así como el periodo de diseño de la estructura.

$$P_o = 4,5$$

$$P_t = 2,0$$

$$n = 20 \text{ años}$$

Segundo paso:

Determinar el número de ejes equivalentes a 18 kips, para lo cual se asumirá un valor de espesor de losa inicial para calcular los factores de camión.

$D = 6''$ para la primera iteración.

En la tabla XLIII se muestra cómo se calculan los factores de camión utilizando la información del tráfico vehicular y de las tablas de los factores equivalentes de carga (tablas de la A-1 a la A-18 del apéndice).

Tabla XLIII. Factor de camión 2

| COMPOSICIÓN DEL FACTOR DE CAMIÓN | | | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| TIPO DE VEHÍCULO | CARGA EN EJE DIRECCIONAL | CARGA EN EJE DE TRACCIÓN | CARGA EN EJE DE ARRASTRE | FACTOR POR EJE DIRECCIONAL | FACTOR POR EJE DE TRACCIÓN | FACTOR POR EJE DE ARRASTRE | FACTOR DE CAMIÓN |
| | kips | kips | kips | | | | |
| Ap | 2 | 2 | --- | 0,0002 | 0,0002 | --- | 0,0004 |
| Ac | 4 | 6 | --- | 0,0020 | 0,0110 | --- | 0,0130 |
| C2 | 10 | 20 | --- | 0,0870 | 1,5500 | --- | 1,6370 |
| C3 | 10 | 32 | --- | 0,0870 | 1,4800 | --- | 1,5670 |
| T2 - S1 | 10 | 18 | 18 | 0,0870 | 1,0000 | 1,0000 | 2,0870 |
| T2 - S2 | 10 | 18 | 32 | 0,0870 | 1,0000 | 1,4800 | 2,5670 |
| T3 - S2 | 10 | 32 | 32 | 0,0870 | 1,4800 | 1,4800 | 3,0470 |
| Factores para: $n = 20$ años ; $P_t = 2,0$; D asumido = $6''$; donde la AASHTO fija $1\ 000\ kg = 2\ kips$ | | | | | | | |

Después, se construirá una tabla para el cálculo del ESAL's para el carril de diseño con el factores de dirección y el factor de carril ya incluidos en el cálculo final de la tabla.

Tabla XLIV. Hoja de trabajo para calcular el ESAL's en el carril de diseño 2

| HOJA DE TRABAJO PARA ESAL's | | | | | |
|---|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| TIPO DE VEHÍCULO | NÚMERO DE VEHICULOS | FACTOR DE CRECIMIENTO | TRÁNSITO DE DISEÑO | FACTOR DE CAMIÓN | ESAL's POR VEHICULOS |
| Ap | 650 | 29,78 | 7065305 | 0,0004 | 2826 |
| Ac | 420 | 26,87 | 4119171 | 0,0130 | 53549 |
| C2 | 165 | 29,78 | 1793501 | 1,6370 | 2935960 |
| C3 | 102 | 26,87 | 1000370 | 1,5670 | 1567580 |
| T2 - S1 | 34 | 24,30 | 301563 | 2,0870 | 629362 |
| T2 - S2 | 51 | 24,30 | 452345 | 2,5670 | 1161168 |
| T3 - S2 | 156 | 26,87 | 1529978 | 3,0470 | 4661842 |
| Σ vehículos = | 1578 | | ESAL's DE DISEÑO = | | 11012288 |
| F_D = | 0,5 | Cálculos para una losa D = 6" asumido | | | |
| F_L = | 0,9 | | | | |
| ESAL's DE CARRIL DE DISEÑO = ESAL's * F_D * F_L = W₁₈ = | | | | | 4955530 |

Tercer paso:

Este paso consiste en determinar todos los valores relacionados con la confiabilidad que se le dará a la estructura de pavimento.

Confiabilidad (R) = 50 (para tránsito < 5x10⁶ de ejes, ver tabla XXIX)

Desviación estándar (S) = 0,35 (recomendado para pavimento rígido)

Factor de seguridad (FS) = 1,00 (para R igual a 50)

Desviación normal estándar en función de R (Z_r) = -0,000

Cuarto paso:

Determinar el coeficiente de drenaje de la capa de sub-base (C_d), para lo cual se utilizarán los datos encontrados de calidad de drenaje y porcentaje del tiempo con niveles de humedad cercanos a la saturación.

Utilizando los datos de la capa de sub-base estudiada:

Calidad de drenaje = regular

$P = 23,3\%$

Se obtiene:

$C_d = 1,00$ (ver tabla XXIII)

Y para el valor de modulo elástico de capa, se asume valores mínimos de CBR para una sub-base granular según especificaciones de libro azul de caminos (ver tablas XI y XII).

$E_{SB} = 16\ 300$ psi (para un CBR = 40%, ver figura 50)

$D_{SB} = 8''$ (20 cm)

Quinto paso:

En este paso se definirán las características que tendrá el concreto que se utilizará en la construcción de la losa de pavimento.

Las características para este caso, serán las siguientes:

$f'_c = 4\ 000$ psi (resistencia a la compresión)

$S'_c = 640$ psi (resistencia a flexión o módulo de ruptura MR)

$E_c = 3\ 830\ 451$ psi (módulo de elasticidad del concreto)

Sexto paso:

Este es el último paso, donde se define la utilización de juntas o pasadores, así como, el tipo de hombros a utilizar.

Para este caso se utilizarán hombros de concreto hidráulico, pero sin pasajuntas, y con esto se determina el factor de transferencia de carga (J).

$$J = 2,8 \text{ (ver tabla XXXII)}$$

5.3.2. Solución de la ecuación para pavimento rígido

Para la solución de la ecuación, se utilizará una hoja de cálculo, con la cual se podrá utilizar todos los números decimales para obtener un resultado con más exactitud.

Al sustituir todos los parámetros en la ecuación, se deberá resolver para K_c , teniendo como punto de partida el modulo de reacción K promedio que se determinó de las muestra 1, 3 y 4.

$$K_{\text{promedio}} = 185 \text{ pci}$$

Entonces se obtiene

$$K_c = 445 \text{ pci (ver figura 44)}$$

Figura 59. Resolviendo la ecuación para K_c

| | |
|---|--|
| $\log(W_{18}) = Z_r S_o + 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{3.46}}} + (4.22 - 0.32 p_i) \log_{10} \left[\frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.03 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right]} \right]$ | |
|---|--|

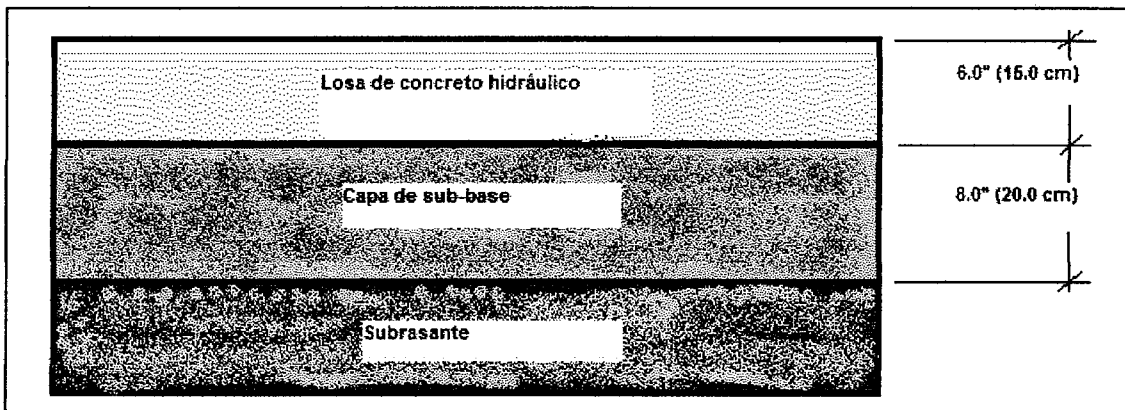
Obteniendo un $\bar{D}_{\text{calculado}} = 5,9''$ (OK)

Teniendo un $\bar{D}_{\text{asumido}} = 6,0''$

Si el valor \bar{D} calculado, fuera mayor en uno al \bar{D} asumido, el proceso se repite utilizando un valor \bar{D} asumido mayor y se tendría que hacer otra iteración cambiando los factores de carga para encontrar un nuevo $\bar{E}SAL$'s de diseño.

De acuerdo con lo calculado, la estructura final de pavimento rígida quedaría de la forma siguiente.

Figura 60. Esquema de la estructura final de pavimento rígido



CONCLUSIONES

1. Con respecto al número final de ejes equivalentes con el que se trabajó cada una de las ecuaciones, es necesario concluir que para el caso de pavimento rígido, el número final de ejes equivalentes para este ejemplo superó el 35% del total de ejes equivalentes de diseño de pavimento flexible; esto se debe a la diferencia que existe entre los factores equivalentes de carga para cada uno de los tipos de estructura, que corresponde a la forma en que responde cada una a las cargas de los vehículos.
2. A pesar de no contar con el equipo correspondiente para realizar los ensayos de compresión triaxial cíclico, se improvisó con el equipo disponible de triaxial para encontrar los valores de módulo de resiliencia de las diferentes muestras, dando como resultado aproximadamente 90% mayor que los módulos resilientes determinados a través de una correlación con el valor de C.B.R., concluyendo satisfactoriamente con los resultados obtenidos, puesto que esta variación no afecta en gran manera el resultado en la ecuación de diseño.
3. Los coeficientes de drenaje son vitales en el comportamiento de una estructura de pavimento, por lo cual se debe tener mucho cuidado y criterio al momento de desarrollarlos, especialmente, cuando se toma en cuenta la geometría de las capas de base y sub-base; ya que esta determina que tan eficiente será en el momento que deba drenar el agua que cae en la época de lluvia. En los ejemplos que se desarrollaron para este trabajo se puede observar que para que funcione correctamente un

drenado en una carretera, las características de los materiales deben corresponder a un grado granulométrico bien distribuido.

4. No se puede olvidar la diferencia que existe entre el módulo de resiliencia y el módulo de reacción, los cuales determinan la forma de trabajo de cada una de las capas de rodadura y toda la estructura en sí, ya que existe una gran afinidad en la forma de absorber la carga vehicular transmitida a la subrasante con respecto a la teoría de diseño de cada una de ellas; ya que una carpeta de mezcla asfáltica transmite mayor carga a las capas subyacentes, es por ello que se construye una capa adicional con respecto a una carpeta de concreto hidráulico, siendo esta último mucho más rígida.
5. Al observar y comparar los diseños finales de cada una de las estructuras, se puede apreciar la diferencia en el espesor total de cada una de las dos estructuras, pudiendo notar que la estructura flexible tiene más espesor debido a la capa extra con respecto a la estructura rígida, pero al ver los costos, estos incluso son mayores en la estructura de pavimento rígido.
6. También, se puede concluir en la importancia de la calidad de los materiales para las capas de base y sub-base, específicamente, en su resistencia a la penetración para tener valores altos de coeficientes estructurales de capa, ya que estos influyen en el espesor de las capas para pavimentos flexible específicamente, partiendo de valores muy buenos del ensayo de Relación Soporte California.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de nivel de tráfico promedio diario anual, así como, el correspondiente incremento para cada tipo de vehículo que se haya previsto en el análisis; de lo contrario, al no poder realizar un estudio de tráfico, se deberá acudir a las municipalidades locales para verificar si existe un estudio realizado, o bien, utilizar una tasa de crecimiento vehicular de 3% para rutas departamentales sin historial de tráfico, el cual es recomendado por la Dirección General de Caminos de Guatemala.
2. Es de gran importancia tener bien claro el tipo de estructura que se desea realizar, ya que cada una de ellas tienen valores efectivos de serviciabilidad diferentes, así como, los costos de construcción inicial y mantenimiento de la obra.
3. Se recomienda utilizar valores de periodos de diseño acorde a las exigencias del tramo, pero nunca menores a 20 años de vida útil. Para carretera de primer orden, se recomienda utilizar periodos de diseño mayores a 25 años de vida útil de la estructura en sí, independientemente de las obras complementarias de mantenimiento de la carpeta final.
4. Se debe notar la importancia de la calidad de los materiales de construcción, como por ejemplo: la resistencia al desgaste mecánico de los materiales para base, sub-base, concreto hidráulico y mezcla asfáltica, así como, la carencia de plasticidad en la parte fina de las mezclas de

base y sub-base y además, que se cuente con una distribución granulométrica bien uniforme.

5. Se recomienda utilizar valores de número estructural inicial mayores a 3 para estructura de pavimento flexible, y espesores de losa iniciales mayores a 6 pulgadas para el caso de estructuras de pavimento rígido.
6. Se sugiere al diseñador de la estructura que para el cálculo del coeficiente de drenaje, se tome en cuenta los regímenes de lluvias que caracterizan a cada zona geográfica del país, para no caer en valores que no sean acorde a la exigencia de cada zona; para ello están las figuras 13 y 14 de este trabajo, ya que al parecer en toda Centro América, con excepción de Nicaragua, estos factores de lluvia no los toman demasiado en serio.
7. Por último, se debe hacer ver al ejecutor la gran importancia de la calidad de la compactación que se tenga en campo para cada una de las capas, ya que así, se asegura la resistencia de la estructura y por lo tanto, que la vida útil que se planteó a principio llegue al final del periodo de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AASHTO. American Association of State Highways and Transportation Official.** *Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing, Part 1, Sixteen Editions,* 1993.
2. **AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures.** *Publicado por: American Association of State Highway and Transportation Officials, Edition 1993.*
3. **ASTM. American Society for Testing and Materials.** *Volume 04.02, Concrete and aggregates,* 2004.
4. Bowles, Joseph E. **Manual de Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil.** Colombia, McGraw Hill, 1980. Pag.70, 74 y 75.
5. Coronado Iturbide, Jorge. **Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos.** Noviembre de 2002.
6. **DGC. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda República de Guatemala.** Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. 2001
7. **Diseño de Pavimentos de Concreto Hidráulico.** Publicado por: CEMEX basado sobre método AASHTO 1993.

8. Londoño, Cipriano. **Diseño, construcción y mantenimiento de Pavimentos de Concreto.** 2001.
9. **Manual Centroamericano para el Diseño Geométrico de la Carreteras Regionales.** Publicado por: SIECA, 2001.
10. **Ministerio de comunicaciones, transportes y obras públicas de Guatemala.** Acuerdo Gubernativo Número 1084-92.
11. Salazar Rodríguez, Aurelio. **Guía para Diseño y Construcción de Pavimentos Rígidos.** Publicado por: El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, S. A. 1998.
12. **THE ASPHALT INSTITUTE. Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets. Manual Series No. 1 (MS-1), September 1981.**

APÉNDICE

Tabla A-1. LEF's para pavimento flexible, ejes simples, Pt = 2,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt = 2,0

| Carga p/eje (kips) ⁶ | Número estructural SN | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| 4 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 6 | 0.009 | 0.012 | 0.011 | 0.010 | 0.009 | 0.009 |
| 8 | 0.03 | 0.035 | 0.036 | 0.033 | 0.031 | 0.029 |
| 10 | 0.075 | 0.085 | 0.090 | 0.085 | 0.079 | 0.076 |
| 12 | 0.165 | 0.177 | 0.189 | 0.183 | 0.174 | 0.168 |
| 14 | 0.325 | 0.338 | 0.354 | 0.350 | 0.338 | 0.331 |
| 16 | 0.589 | 0.598 | 0.613 | 0.612 | 0.603 | 0.596 |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20 | 1.61 | 1.59 | 1.56 | 1.55 | 1.57 | 1.59 |
| 22 | 2.49 | 2.44 | 2.35 | 2.31 | 2.35 | 2.41 |
| 24 | 3.71 | 3.62 | 3.43 | 3.33 | 3.40 | 3.51 |
| 26 | 5.36 | 5.21 | 4.88 | 4.68 | 4.77 | 4.96 |
| 28 | 7.54 | 7.31 | 6.78 | 6.42 | 6.52 | 6.83 |
| 30 | 10.4 | 10.0 | 9.2 | 8.6 | 8.7 | 9.2 |
| 32 | 14.0 | 13.5 | 12.4 | 11.5 | 11.5 | 12.1 |
| 34 | 18.5 | 17.9 | 16.3 | 15.0 | 14.9 | 15.6 |
| 36 | 24.2 | 23.3 | 21.2 | 19.3 | 19.0 | 19.9 |
| 38 | 31.1 | 29.9 | 27.1 | 24.6 | 24.0 | 25.1 |
| 40 | 39.6 | 38.0 | 34.3 | 30.9 | 30.0 | 31.2 |
| 42 | 49.7 | 47.7 | 43.0 | 38.6 | 37.2 | 38.5 |
| 44 | 61.8 | 59.3 | 53.4 | 47.6 | 45.7 | 47.1 |
| 46 | 76.1 | 73.0 | 65.6 | 58.3 | 55.7 | 57.0 |
| 48 | 92.9 | 89.1 | 80.0 | 70.9 | 67.3 | 68.6 |
| 50 | 113. | 108. | 97. | 86. | 81. | 82. |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.
Tabla D-1

Tabla A-2. LEF's para pavimento flexible, ejes tándem, Pt = 2,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, Pt = 2,0

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| 6 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 8 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.002 |
| 10 | 0.007 | 0.008 | 0.008 | 0.007 | 0.006 | 0.006 |
| 12 | 0.013 | 0.016 | 0.016 | 0.014 | 0.013 | 0.012 |
| 14 | 0.024 | 0.029 | 0.029 | 0.026 | 0.024 | 0.023 |
| 16 | 0.041 | 0.048 | 0.050 | 0.046 | 0.042 | 0.040 |
| 18 | 0.066 | 0.077 | 0.081 | 0.075 | 0.069 | 0.066 |
| 20 | 0.103 | 0.117 | 0.124 | 0.117 | 0.109 | 0.105 |
| 22 | 0.156 | 0.171 | 0.183 | 0.174 | 0.164 | 0.158 |
| 24 | 0.227 | 0.244 | 0.260 | 0.252 | 0.239 | 0.231 |
| 26 | 0.322 | 0.340 | 0.360 | 0.353 | 0.338 | 0.329 |
| 28 | 0.447 | 0.465 | 0.487 | 0.481 | 0.466 | 0.455 |
| 30 | 0.607 | 0.623 | 0.646 | 0.643 | 0.627 | 0.617 |
| 32 | 0.810 | 0.823 | 0.843 | 0.842 | 0.829 | 0.819 |
| 34 | 1.06 | 1.07 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.07 |
| 36 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 |
| 38 | 1.76 | 1.75 | 1.73 | 1.72 | 1.73 | 1.74 |
| 40 | 2.22 | 2.19 | 2.15 | 2.13 | 2.16 | 2.18 |
| 42 | 2.77 | 2.73 | 2.64 | 2.62 | 2.66 | 2.70 |
| 44 | 3.42 | 3.36 | 3.23 | 3.18 | 3.24 | 3.31 |
| 46 | 4.20 | 4.11 | 3.92 | 3.83 | 3.91 | 4.02 |
| 48 | 5.10 | 4.98 | 4.72 | 4.58 | 4.68 | 4.83 |
| 50 | 6.15 | 5.99 | 5.64 | 5.44 | 5.56 | 5.77 |
| 52 | 7.37 | 7.16 | 6.71 | 6.43 | 6.56 | 6.83 |
| 54 | 8.77 | 8.51 | 7.93 | 7.55 | 7.69 | 8.03 |
| 56 | 10.4 | 10.1 | 9.3 | 8.8 | 9.0 | 9.4 |
| 58 | 12.2 | 11.8 | 10.9 | 10.3 | 10.4 | 10.9 |
| 60 | 14.3 | 13.8 | 12.7 | 11.9 | 12.0 | 12.6 |
| 62 | 16.6 | 16.0 | 14.7 | 13.7 | 13.8 | 14.5 |
| 64 | 19.3 | 18.6 | 17.0 | 15.8 | 15.8 | 16.6 |
| 66 | 22.2 | 21.4 | 19.6 | 18.0 | 18.0 | 18.9 |
| 68 | 25.5 | 24.6 | 22.4 | 20.6 | 20.5 | 21.5 |
| 70 | 29.2 | 28.1 | 25.6 | 23.4 | 23.2 | 24.3 |
| 72 | 33.3 | 32.0 | 29.1 | 26.5 | 26.2 | 27.4 |
| 74 | 37.8 | 36.4 | 33.0 | 30.0 | 29.4 | 30.8 |
| 76 | 42.8 | 41.2 | 37.3 | 33.8 | 33.1 | 34.5 |
| 78 | 48.4 | 46.5 | 42.0 | 38.0 | 37.0 | 38.6 |
| 80 | 54.4 | 52.3 | 47.2 | 42.5 | 41.3 | 43.0 |
| 82 | 61.1 | 58.7 | 52.9 | 47.6 | 46.0 | 47.8 |
| 84 | 68.4 | 65.7 | 59.2 | 53.0 | 51.2 | 53.0 |
| 86 | 76.3 | 73.3 | 66.0 | 59.0 | 56.8 | 58.6 |
| 88 | 85.0 | 81.6 | 73.4 | 65.5 | 62.8 | 64.7 |
| 90 | 94.4 | 90.6 | 81.5 | 72.6 | 69.4 | 71.3 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.
Tabla D-2

Tabla A-3. LEF's para pavimento flexible, ejes tridem, Pt = 2,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt = 2,0

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 6 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| 8 | 0.0009 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0007 |
| 10 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.001 |
| 12 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 14 | 0.006 | 0.007 | 0.007 | 0.006 | 0.006 | 0.005 |
| 16 | 0.010 | 0.012 | 0.012 | 0.010 | 0.009 | 0.009 |
| 18 | 0.016 | 0.019 | 0.019 | 0.017 | 0.015 | 0.015 |
| 20 | 0.024 | 0.029 | 0.029 | 0.026 | 0.024 | 0.023 |
| 22 | 0.034 | 0.042 | 0.042 | 0.038 | 0.035 | 0.034 |
| 24 | 0.049 | 0.058 | 0.060 | 0.055 | 0.051 | 0.048 |
| 26 | 0.068 | 0.080 | 0.083 | 0.077 | 0.071 | 0.068 |
| 28 | 0.093 | 0.107 | 0.113 | 0.105 | 0.098 | 0.094 |
| 30 | 0.125 | 0.140 | 0.149 | 0.140 | 0.131 | 0.126 |
| 32 | 0.164 | 0.182 | 0.194 | 0.184 | 0.173 | 0.167 |
| 34 | 0.213 | 0.233 | 0.248 | 0.238 | 0.225 | 0.217 |
| 36 | 0.273 | 0.294 | 0.313 | 0.303 | 0.288 | 0.279 |
| 38 | 0.346 | 0.368 | 0.390 | 0.381 | 0.364 | 0.353 |
| 40 | 0.434 | 0.456 | 0.481 | 0.473 | 0.454 | 0.443 |
| 42 | 0.538 | 0.560 | 0.587 | 0.580 | 0.561 | 0.548 |
| 44 | 0.662 | 0.682 | 0.710 | 0.705 | 0.686 | 0.673 |
| 46 | 0.807 | 0.825 | 0.852 | 0.849 | 0.831 | 0.818 |
| 48 | 0.976 | 0.992 | 1.015 | 1.014 | 0.999 | 0.987 |
| 50 | 1.17 | 1.18 | 1.20 | 1.20 | 1.19 | 1.18 |
| 52 | 1.40 | 1.40 | 1.42 | 1.42 | 1.41 | 1.40 |
| 54 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 |
| 56 | 1.95 | 1.95 | 1.93 | 1.93 | 1.94 | 1.94 |
| 58 | 2.29 | 2.27 | 2.24 | 2.23 | 2.25 | 2.27 |
| 60 | 2.67 | 2.64 | 2.59 | 2.57 | 2.60 | 2.63 |
| 62 | 3.10 | 3.05 | 2.98 | 2.95 | 2.99 | 3.04 |
| 64 | 3.59 | 3.53 | 3.41 | 3.37 | 3.42 | 3.49 |
| 66 | 4.13 | 4.05 | 3.89 | 3.83 | 3.90 | 3.99 |
| 68 | 4.73 | 4.63 | 4.43 | 4.34 | 4.42 | 4.54 |
| 70 | 5.40 | 5.28 | 5.03 | 4.90 | 5.00 | 5.15 |
| 72 | 6.15 | 6.00 | 5.68 | 5.52 | 5.63 | 5.82 |
| 74 | 6.97 | 6.79 | 6.41 | 6.20 | 6.33 | 6.56 |
| 76 | 7.88 | 7.67 | 7.21 | 6.94 | 7.08 | 7.36 |
| 78 | 8.88 | 8.63 | 8.09 | 7.75 | 7.90 | 8.23 |
| 80 | 9.96 | 9.69 | 9.05 | 8.63 | 8.79 | 9.16 |
| 82 | 11.2 | 10.8 | 10.1 | 9.6 | 9.8 | 10.2 |
| 84 | 12.5 | 12.1 | 11.2 | 10.6 | 10.8 | 11.3 |
| 86 | 13.9 | 13.5 | 12.5 | 11.8 | 11.9 | 12.5 |
| 88 | 15.5 | 15.0 | 13.8 | 13.0 | 13.2 | 13.8 |
| 90 | 17.2 | 16.6 | 15.3 | 14.3 | 14.5 | 15.2 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-3

Tabla A-4. LEF's para pavimento flexible, ejes simples, Pt = 2,5

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt = 2,5

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| 4 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| 6 | 0.011 | 0.017 | 0.017 | 0.013 | 0.010 | 0.009 |
| 8 | 0.032 | 0.047 | 0.051 | 0.041 | 0.034 | 0.031 |
| 10 | 0.078 | 0.102 | 0.118 | 0.102 | 0.088 | 0.080 |
| 12 | 0.168 | 0.198 | 0.229 | 0.213 | 0.189 | 0.176 |
| 14 | 0.328 | 0.358 | 0.399 | 0.388 | 0.360 | 0.342 |
| 16 | 0.591 | 0.613 | 0.646 | 0.645 | 0.623 | 0.606 |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20 | 1.61 | 1.57 | 1.49 | 1.47 | 1.51 | 1.55 |
| 22 | 2.48 | 2.38 | 2.17 | 2.09 | 2.18 | 2.30 |
| 24 | 3.69 | 3.49 | 3.09 | 2.89 | 3.03 | 3.27 |
| 26 | 5.33 | 4.99 | 4.31 | 3.91 | 4.09 | 4.48 |
| 28 | 7.49 | 6.98 | 5.90 | 5.21 | 5.39 | 5.98 |
| 30 | 10.3 | 9.5 | 7.9 | 6.8 | 7.0 | 7.8 |
| 32 | 13.9 | 12.8 | 10.5 | 8.8 | 8.9 | 10.0 |
| 34 | 18.4 | 16.9 | 13.7 | 11.3 | 11.2 | 12.5 |
| 36 | 24.0 | 22.0 | 17.7 | 14.4 | 13.9 | 15.5 |
| 38 | 30.9 | 28.3 | 22.6 | 18.1 | 17.2 | 19.0 |
| 40 | 39.3 | 35.9 | 28.5 | 22.5 | 21.1 | 23.0 |
| 42 | 49.3 | 45.0 | 35.6 | 27.8 | 25.6 | 27.7 |
| 44 | 61.3 | 55.9 | 44.0 | 34.0 | 31.0 | 33.1 |
| 46 | 75.5 | 68.8 | 54.0 | 41.4 | 37.2 | 39.3 |
| 48 | 92.2 | 83.9 | 65.7 | 50.1 | 44.5 | 46.5 |
| 50 | 112. | 102 | 79. | 60. | 53. | 55. |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-4

Tabla A-5. LEF's para pavimento flexible, ejes tándem, Pt = 2,5

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, Pt = 2,5

| Carga eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0002 |
| 6 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 8 | 0.004 | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.003 |
| 10 | 0.008 | 0.013 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.006 |
| 12 | 0.015 | 0.024 | 0.023 | 0.018 | 0.014 | 0.013 |
| 14 | 0.026 | 0.041 | 0.042 | 0.033 | 0.027 | 0.024 |
| 16 | 0.044 | 0.065 | 0.070 | 0.057 | 0.047 | 0.043 |
| 18 | 0.070 | 0.097 | 0.109 | 0.092 | 0.077 | 0.070 |
| 20 | 0.107 | 0.141 | 0.162 | 0.141 | 0.121 | 0.110 |
| 22 | 0.160 | 0.196 | 0.229 | 0.207 | 0.180 | 0.166 |
| 24 | 0.231 | 0.273 | 0.315 | 0.292 | 0.260 | 0.242 |
| 26 | 0.327 | 0.370 | 0.420 | 0.401 | 0.364 | 0.342 |
| 28 | 0.451 | 0.493 | 0.548 | 0.534 | 0.495 | 0.470 |
| 30 | 0.611 | 0.648 | 0.703 | 0.695 | 0.658 | 0.633 |
| 32 | 0.813 | 0.843 | 0.889 | 0.887 | 0.857 | 0.834 |
| 34 | 1.06 | 1.08 | 1.11 | 1.11 | 1.09 | 1.08 |
| 36 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 |
| 38 | 1.75 | 1.73 | 1.69 | 1.68 | 1.70 | 1.73 |
| 40 | 2.21 | 2.16 | 2.06 | 2.03 | 2.08 | 2.14 |
| 42 | 2.76 | 2.67 | 2.49 | 2.43 | 2.51 | 2.61 |
| 44 | 3.41 | 3.27 | 2.99 | 2.88 | 3.00 | 3.16 |
| 46 | 4.18 | 3.98 | 3.58 | 3.40 | 3.55 | 3.79 |
| 48 | 5.08 | 4.80 | 4.25 | 3.98 | 4.17 | 4.49 |
| 50 | 6.12 | 5.76 | 5.03 | 4.64 | 4.86 | 5.28 |
| 52 | 7.33 | 6.87 | 5.93 | 5.38 | 5.63 | 6.17 |
| 54 | 8.72 | 8.14 | 6.95 | 6.22 | 6.47 | 7.15 |
| 56 | 10.3 | 9.6 | 8.1 | 7.2 | 7.4 | 8.2 |
| 58 | 12.1 | 11.3 | 9.4 | 8.2 | 8.4 | 9.4 |
| 60 | 14.2 | 13.1 | 10.9 | 9.4 | 9.6 | 10.7 |
| 62 | 16.5 | 15.3 | 12.6 | 10.7 | 10.8 | 12.1 |
| 64 | 19.1 | 17.6 | 14.5 | 12.2 | 12.2 | 13.7 |
| 66 | 22.1 | 20.3 | 16.6 | 13.8 | 13.7 | 15.4 |
| 68 | 26.3 | 23.3 | 18.9 | 15.6 | 15.4 | 17.2 |
| 70 | 29.0 | 26.6 | 21.5 | 17.6 | 17.2 | 19.2 |
| 72 | 33.0 | 30.3 | 24.4 | 19.8 | 19.2 | 21.3 |
| 74 | 37.5 | 34.4 | 27.6 | 22.2 | 21.3 | 23.6 |
| 76 | 42.5 | 38.9 | 31.1 | 24.8 | 23.7 | 26.1 |
| 78 | 48.0 | 43.9 | 35.0 | 27.8 | 26.2 | 28.8 |
| 80 | 54.0 | 49.4 | 39.2 | 30.9 | 29.0 | 31.7 |
| 82 | 60.6 | 55.4 | 43.9 | 34.4 | 32.0 | 34.8 |
| 84 | 67.8 | 61.9 | 49.0 | 38.2 | 35.3 | 38.1 |
| 86 | 75.7 | 69.1 | 54.5 | 42.3 | 38.8 | 41.7 |
| 88 | 84.3 | 76.9 | 60.6 | 46.8 | 42.6 | 45.6 |
| 90 | 93.7 | 85.4 | 67.1 | 51.7 | 46.8 | 49.7 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-5

Tabla A-6. LEF's para pavimento flexible, ejes tridem, Pt = 2,5

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt = 2,5

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 6 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0003 |
| 8 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 10 | 0.003 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 12 | 0.005 | 0.007 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.003 |
| 14 | 0.008 | 0.012 | 0.010 | 0.008 | 0.006 | 0.006 |
| 16 | 0.012 | 0.019 | 0.018 | 0.013 | 0.011 | 0.010 |
| 18 | 0.018 | 0.029 | 0.028 | 0.021 | 0.017 | 0.016 |
| 20 | 0.027 | 0.042 | 0.042 | 0.032 | 0.027 | 0.024 |
| 22 | 0.038 | 0.058 | 0.060 | 0.048 | 0.040 | 0.036 |
| 24 | 0.053 | 0.078 | 0.084 | 0.068 | 0.057 | 0.051 |
| 26 | 0.072 | 0.103 | 0.114 | 0.095 | 0.080 | 0.072 |
| 28 | 0.098 | 0.133 | 0.151 | 0.128 | 0.109 | 0.099 |
| 30 | 0.129 | 0.169 | 0.195 | 0.170 | 0.145 | 0.133 |
| 32 | 0.169 | 0.213 | 0.247 | 0.220 | 0.191 | 0.175 |
| 34 | 0.219 | 0.266 | 0.308 | 0.281 | 0.246 | 0.228 |
| 36 | 0.279 | 0.329 | 0.379 | 0.352 | 0.313 | 0.292 |
| 38 | 0.352 | 0.403 | 0.461 | 0.436 | 0.393 | 0.368 |
| 40 | 0.439 | 0.491 | 0.554 | 0.533 | 0.487 | 0.459 |
| 42 | 0.543 | 0.594 | 0.661 | 0.644 | 0.597 | 0.567 |
| 44 | 0.666 | 0.714 | 0.781 | 0.769 | 0.723 | 0.692 |
| 46 | 0.811 | 0.854 | 0.918 | 0.911 | 0.868 | 0.838 |
| 48 | 0.979 | 1.015 | 1.072 | 1.069 | 1.033 | 1.005 |
| 50 | 1.17 | 1.20 | 1.24 | 1.25 | 1.22 | 1.20 |
| 52 | 1.40 | 1.41 | 1.44 | 1.44 | 1.43 | 1.41 |
| 54 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 |
| 56 | 1.95 | 1.93 | 1.90 | 1.90 | 1.91 | 1.93 |
| 58 | 2.29 | 2.25 | 2.17 | 2.16 | 2.20 | 2.24 |
| 60 | 2.67 | 2.60 | 2.48 | 2.44 | 2.51 | 2.58 |
| 62 | 3.09 | 3.00 | 2.82 | 2.76 | 2.85 | 2.95 |
| 64 | 3.57 | 3.44 | 3.19 | 3.10 | 3.22 | 3.36 |
| 66 | 4.11 | 3.94 | 3.61 | 3.47 | 3.62 | 3.81 |
| 68 | 4.71 | 4.49 | 4.06 | 3.88 | 4.05 | 4.30 |
| 70 | 5.38 | 5.11 | 4.57 | 4.32 | 4.52 | 4.84 |
| 72 | 6.12 | 5.79 | 5.13 | 4.80 | 5.03 | 5.41 |
| 74 | 6.93 | 6.54 | 5.74 | 5.32 | 5.57 | 6.04 |
| 76 | 7.84 | 7.37 | 6.41 | 5.88 | 6.15 | 6.71 |
| 78 | 8.83 | 8.28 | 7.14 | 6.49 | 6.78 | 7.43 |
| 80 | 9.92 | 9.28 | 7.95 | 7.15 | 7.45 | 8.21 |
| 82 | 11.1 | 10.4 | 8.8 | 7.9 | 8.2 | 9.0 |
| 84 | 12.4 | 11.6 | 9.8 | 8.6 | 8.9 | 9.9 |
| 86 | 13.8 | 12.9 | 10.8 | 9.5 | 9.8 | 10.9 |
| 88 | 15.4 | 14.3 | 11.9 | 10.4 | 10.6 | 11.9 |
| 90 | 17.1 | 15.8 | 13.2 | 11.3 | 11.6 | 12.9 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-6

Tabla A-7. LEF's para pavimento flexible, ejes simples, Pt = 3,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, Pt = 3,0

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0008 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 |
| 4 | 0.004 | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| 6 | 0.014 | 0.030 | 0.028 | 0.018 | 0.012 | 0.010 |
| 8 | 0.035 | 0.070 | 0.080 | 0.055 | 0.040 | 0.034 |
| 10 | 0.082 | 0.132 | 0.168 | 0.132 | 0.101 | 0.086 |
| 12 | 0.173 | 0.231 | 0.296 | 0.260 | 0.212 | 0.187 |
| 14 | 0.332 | 0.388 | 0.468 | 0.447 | 0.391 | 0.358 |
| 16 | 0.594 | 0.633 | 0.695 | 0.693 | 0.651 | 0.622 |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20 | 1.60 | 1.53 | 1.41 | 1.38 | 1.44 | 1.51 |
| 22 | 2.47 | 2.29 | 1.96 | 1.83 | 1.97 | 2.16 |
| 24 | 3.67 | 3.33 | 2.69 | 2.39 | 2.60 | 2.96 |
| 26 | 5.29 | 4.72 | 3.65 | 3.08 | 3.33 | 3.91 |
| 28 | 7.43 | 6.56 | 4.88 | 3.93 | 4.17 | 5.00 |
| 30 | 10.2 | 8.9 | 6.5 | 5.0 | 5.1 | 6.3 |
| 32 | 13.8 | 12.0 | 8.4 | 6.2 | 6.3 | 7.7 |
| 34 | 18.2 | 15.7 | 10.9 | 7.8 | 7.6 | 9.3 |
| 36 | 23.8 | 20.4 | 14.0 | 9.7 | 9.1 | 11.0 |
| 38 | 30.6 | 26.2 | 17.7 | 11.9 | 11.0 | 13.0 |
| 40 | 38.8 | 33.2 | 22.2 | 14.6 | 13.1 | 15.3 |
| 42 | 48.8 | 41.6 | 27.6 | 17.8 | 15.5 | 17.8 |
| 44 | 60.6 | 51.6 | 34.0 | 21.6 | 18.4 | 20.6 |
| 46 | 74.7 | 63.4 | 41.5 | 26.1 | 21.6 | 23.8 |
| 48 | 91.2 | 77.3 | 50.3 | 31.3 | 25.4 | 27.4 |
| 50 | 110. | 94. | 61. | 37. | 30. | 32. |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-7

Tabla A-8. LEF's para pavimento flexible, ejes tándem, $P_t = 3,0$

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, $P_t = 3,0$

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 6 | 0.003 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 8 | 0.006 | 0.011 | 0.009 | 0.005 | 0.003 | 0.003 |
| 10 | 0.011 | 0.024 | 0.020 | 0.012 | 0.008 | 0.007 |
| 12 | 0.019 | 0.042 | 0.039 | 0.024 | 0.017 | 0.014 |
| 14 | 0.031 | 0.066 | 0.068 | 0.045 | 0.032 | 0.026 |
| 16 | 0.049 | 0.096 | 0.109 | 0.076 | 0.055 | 0.046 |
| 18 | 0.075 | 0.134 | 0.164 | 0.121 | 0.090 | 0.076 |
| 20 | 0.113 | 0.181 | 0.232 | 0.182 | 0.139 | 0.119 |
| 22 | 0.166 | 0.241 | 0.313 | 0.260 | 0.205 | 0.178 |
| 24 | 0.238 | 0.317 | 0.407 | 0.358 | 0.292 | 0.257 |
| 26 | 0.333 | 0.413 | 0.517 | 0.476 | 0.402 | 0.360 |
| 28 | 0.457 | 0.534 | 0.643 | 0.614 | 0.538 | 0.492 |
| 30 | 0.616 | 0.684 | 0.788 | 0.773 | 0.702 | 0.656 |
| 32 | 0.817 | 0.870 | 0.956 | 0.953 | 0.896 | 0.855 |
| 34 | 1.07 | 1.10 | 1.15 | 1.15 | 1.12 | 1.09 |
| 36 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 1.38 |
| 38 | 1.75 | 1.71 | 1.64 | 1.62 | 1.66 | 1.70 |
| 40 | 2.21 | 2.11 | 1.94 | 1.89 | 1.98 | 2.08 |
| 42 | 2.75 | 2.59 | 2.29 | 2.19 | 2.33 | 2.50 |
| 44 | 3.39 | 3.15 | 2.70 | 2.52 | 2.71 | 2.97 |
| 46 | 4.15 | 3.81 | 3.16 | 2.89 | 3.13 | 3.50 |
| 48 | 5.04 | 4.58 | 3.70 | 3.29 | 3.57 | 4.07 |
| 50 | 6.08 | 5.47 | 4.31 | 3.74 | 4.05 | 4.70 |
| 52 | 7.27 | 6.49 | 5.01 | 4.24 | 4.57 | 5.37 |
| 54 | 8.65 | 7.67 | 5.81 | 4.79 | 5.13 | 6.10 |
| 56 | 10.2 | 9.0 | 6.7 | 5.4 | 5.7 | 6.9 |
| 58 | 12.0 | 10.6 | 7.7 | 6.1 | 6.4 | 7.7 |
| 60 | 14.1 | 12.3 | 8.9 | 6.8 | 7.1 | 9.8 |
| 62 | 16.3 | 14.2 | 10.2 | 7.7 | 7.8 | 9.5 |
| 64 | 18.9 | 16.4 | 11.6 | 8.6 | 8.6 | 10.5 |
| 66 | 21.8 | 18.9 | 13.2 | 9.6 | 9.5 | 11.6 |
| 68 | 25.1 | 21.7 | 15.0 | 10.7 | 10.5 | 12.7 |
| 70 | 28.7 | 24.7 | 17.0 | 12.0 | 11.5 | 13.9 |
| 72 | 32.7 | 28.1 | 19.2 | 13.3 | 12.6 | 15.2 |
| 74 | 37.2 | 31.9 | 21.6 | 14.8 | 13.8 | 16.5 |
| 76 | 42.1 | 36.0 | 24.3 | 16.4 | 15.1 | 17.9 |
| 78 | 47.5 | 40.6 | 27.3 | 18.2 | 16.5 | 19.4 |
| 80 | 53.4 | 45.7 | 30.5 | 20.1 | 18.0 | 21.0 |
| 82 | 60.0 | 51.2 | 34.0 | 22.2 | 19.6 | 22.7 |
| 84 | 67.1 | 57.2 | 37.9 | 24.6 | 21.3 | 24.5 |
| 86 | 74.9 | 63.8 | 42.1 | 27.1 | 23.2 | 26.4 |
| 88 | 83.4 | 71.0 | 46.7 | 29.8 | 25.2 | 28.4 |
| 90 | 92.7 | 78.8 | 51.7 | 32.7 | 27.4 | 30.5 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-8

Tabla A-9. LEF's para pavimento flexible, ejes tridem, Pt = 3,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, Pt = 3,0

| Carga p/eje (kips) | Número estructural SN | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 4 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 |
| 6 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| 8 | 0.003 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 10 | 0.005 | 0.008 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| 12 | 0.007 | 0.014 | 0.010 | 0.006 | 0.004 | 0.003 |
| 14 | 0.011 | 0.023 | 0.018 | 0.011 | 0.007 | 0.006 |
| 16 | 0.016 | 0.035 | 0.030 | 0.018 | 0.013 | 0.010 |
| 18 | 0.022 | 0.050 | 0.047 | 0.029 | 0.020 | 0.017 |
| 20 | 0.031 | 0.069 | 0.069 | 0.044 | 0.031 | 0.026 |
| 22 | 0.043 | 0.090 | 0.097 | 0.065 | 0.046 | 0.039 |
| 24 | 0.059 | 0.116 | 0.132 | 0.092 | 0.066 | 0.056 |
| 26 | 0.079 | 0.145 | 0.174 | 0.126 | 0.092 | 0.078 |
| 28 | 0.104 | 0.179 | 0.223 | 0.168 | 0.126 | 0.107 |
| 30 | 0.136 | 0.218 | 0.279 | 0.219 | 0.167 | 0.143 |
| 32 | 0.176 | 0.265 | 0.342 | 0.279 | 0.218 | 0.188 |
| 34 | 0.226 | 0.319 | 0.413 | 0.350 | 0.279 | 0.243 |
| 36 | 0.286 | 0.382 | 0.491 | 0.432 | 0.352 | 0.310 |
| 38 | 0.359 | 0.456 | 0.577 | 0.524 | 0.437 | 0.389 |
| 40 | 0.447 | 0.543 | 0.671 | 0.626 | 0.536 | 0.483 |
| 42 | 0.550 | 0.643 | 0.775 | 0.740 | 0.649 | 0.593 |
| 44 | 0.673 | 0.760 | 0.889 | 0.865 | 0.777 | 0.720 |
| 46 | 0.817 | 0.894 | 1.014 | 1.001 | 0.920 | 0.865 |
| 48 | 0.984 | 1.048 | 1.152 | 1.148 | 1.080 | 1.030 |
| 50 | 1.18 | 1.23 | 1.30 | 1.31 | 1.26 | 1.22 |
| 52 | 1.40 | 1.43 | 1.47 | 1.48 | 1.45 | 1.43 |
| 54 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 |
| 56 | 1.95 | 1.92 | 1.86 | 1.85 | 1.88 | 1.91 |
| 58 | 2.28 | 2.21 | 2.09 | 2.06 | 2.13 | 2.20 |
| 60 | 2.66 | 2.54 | 2.34 | 2.28 | 2.39 | 2.50 |
| 62 | 3.08 | 2.92 | 2.61 | 2.52 | 2.66 | 2.84 |
| 64 | 3.56 | 3.33 | 2.92 | 2.77 | 2.96 | 3.19 |
| 66 | 4.09 | 3.79 | 3.25 | 3.04 | 3.27 | 3.58 |
| 68 | 4.68 | 4.31 | 3.62 | 3.33 | 3.60 | 4.00 |
| 70 | 5.34 | 4.88 | 4.02 | 3.64 | 3.94 | 4.44 |
| 72 | 6.08 | 5.51 | 4.46 | 3.97 | 4.31 | 4.91 |
| 74 | 6.89 | 6.21 | 4.94 | 4.32 | 4.69 | 5.40 |
| 76 | 7.76 | 6.98 | 5.47 | 4.70 | 5.09 | 5.93 |
| 78 | 8.76 | 7.83 | 6.04 | 5.11 | 5.51 | 6.48 |
| 80 | 9.84 | 8.75 | 6.67 | 5.54 | 5.96 | 7.06 |
| 82 | 11.0 | 9.8 | 7.4 | 6.0 | 6.4 | 7.7 |
| 84 | 12.3 | 10.9 | 8.1 | 6.5 | 6.9 | 8.3 |
| 86 | 13.7 | 12.1 | 8.9 | 7.0 | 7.4 | 9.0 |
| 88 | 15.3 | 13.4 | 9.8 | 7.6 | 8.0 | 9.6 |
| 90 | 16.9 | 14.8 | 10.7 | 8.2 | 8.5 | 10.4 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-9

Tabla A-10. LEF's para pavimento rígido, ejes simples, $P_t = 2,0$

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, $P_t = 2,0$

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| 4 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 6 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 8 | 0.035 | 0.033 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 |
| 10 | 0.087 | 0.084 | 0.082 | 0.081 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 12 | 0.186 | 0.180 | 0.176 | 0.175 | 0.174 | 0.174 | 0.173 | 0.173 | 0.173 |
| 14 | 0.353 | 0.346 | 0.341 | 0.338 | 0.337 | 0.336 | 0.336 | 0.336 | 0.336 |
| 16 | 0.614 | 0.609 | 0.604 | 0.601 | 0.599 | 0.599 | 0.598 | 0.598 | 0.598 |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20 | 1.55 | 1.56 | 1.57 | 1.58 | 1.58 | 1.59 | 1.59 | 1.59 | 1.59 |
| 22 | 2.32 | 2.32 | 2.35 | 2.38 | 2.40 | 2.41 | 2.41 | 2.41 | 2.42 |
| 24 | 3.37 | 3.34 | 3.40 | 3.47 | 3.51 | 3.53 | 3.54 | 3.55 | 3.55 |
| 26 | 4.76 | 4.69 | 4.77 | 4.88 | 4.97 | 5.02 | 5.04 | 5.06 | 5.06 |
| 28 | 6.48 | 6.44 | 6.52 | 6.70 | 6.85 | 6.94 | 7.00 | 7.02 | 7.04 |
| 30 | 8.92 | 8.68 | 8.74 | 8.98 | 9.23 | 9.39 | 9.48 | 9.54 | 9.56 |
| 32 | 11.9 | 11.5 | 11.5 | 11.8 | 12.2 | 12.4 | 12.6 | 12.7 | 12.7 |
| 34 | 15.5 | 15.0 | 14.9 | 15.3 | 15.8 | 16.2 | 16.4 | 16.6 | 16.7 |
| 36 | 20.1 | 19.3 | 19.2 | 19.5 | 20.1 | 20.7 | 21.1 | 21.4 | 21.5 |
| 38 | 25.6 | 24.5 | 24.3 | 24.6 | 25.4 | 26.1 | 26.7 | 27.1 | 27.4 |
| 40 | 32.2 | 30.8 | 30.4 | 30.7 | 31.6 | 32.6 | 33.4 | 34.0 | 34.4 |
| 42 | 40.1 | 38.4 | 37.7 | 38.0 | 38.9 | 40.1 | 41.3 | 42.1 | 42.7 |
| 44 | 49.4 | 47.3 | 46.4 | 46.6 | 47.6 | 49.0 | 50.4 | 51.6 | 52.7 |
| 46 | 60.4 | 57.7 | 56.6 | 56.7 | 57.7 | 59.3 | 61.1 | 62.6 | 63.7 |
| 48 | 73.2 | 69.9 | 68.4 | 68.4 | 69.4 | 71.2 | 73.3 | 75.3 | 76.8 |
| 50 | 88.0 | 84.1 | 82.2 | 82.0 | 83.0 | 84.9 | 87.4 | 89.8 | 91.7 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-10

Tabla A-11. LEF's para pavimento rígido, ejes tándem, $P_t = 2,0$

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, $P_t = 2,0$

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 4 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| 6 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 8 | 0.006 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 10 | 0.014 | 0.013 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| 12 | 0.028 | 0.026 | 0.026 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| 14 | 0.051 | 0.049 | 0.048 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 |
| 16 | 0.087 | 0.084 | 0.082 | 0.081 | 0.081 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 18 | 0.141 | 0.136 | 0.133 | 0.132 | 0.131 | 0.131 | 0.131 | 0.131 | 0.131 |
| 20 | 0.216 | 0.210 | 0.206 | 0.204 | 0.203 | 0.203 | 0.203 | 0.203 | 0.203 |
| 22 | 0.319 | 0.313 | 0.307 | 0.305 | 0.304 | 0.303 | 0.303 | 0.303 | 0.303 |
| 24 | 0.454 | 0.449 | 0.444 | 0.441 | 0.440 | 0.439 | 0.439 | 0.439 | 0.439 |
| 26 | 0.629 | 0.626 | 0.622 | 0.620 | 0.618 | 0.618 | 0.618 | 0.618 | 0.618 |
| 28 | 0.852 | 0.851 | 0.850 | 0.850 | 0.850 | 0.849 | 0.849 | 0.849 | 0.849 |
| 30 | 1.13 | 1.13 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 |
| 32 | 1.48 | 1.48 | 1.49 | 1.50 | 1.51 | 1.51 | 1.51 | 1.51 | 1.51 |
| 34 | 1.90 | 1.90 | 1.93 | 1.95 | 1.96 | 1.97 | 1.97 | 1.97 | 1.97 |
| 36 | 2.42 | 2.41 | 2.45 | 2.49 | 2.51 | 2.52 | 2.53 | 2.53 | 2.53 |
| 38 | 3.04 | 3.02 | 3.07 | 3.13 | 3.17 | 3.19 | 3.20 | 3.20 | 3.21 |
| 40 | 3.79 | 3.74 | 3.80 | 3.89 | 3.95 | 3.98 | 4.00 | 4.01 | 4.01 |
| 42 | 4.67 | 4.59 | 4.66 | 4.78 | 4.87 | 4.93 | 4.95 | 4.97 | 4.97 |
| 44 | 5.72 | 5.59 | 5.67 | 5.82 | 5.95 | 6.03 | 6.07 | 6.09 | 6.10 |
| 46 | 6.94 | 6.76 | 6.83 | 7.02 | 7.20 | 7.31 | 7.37 | 7.41 | 7.43 |
| 48 | 8.36 | 8.12 | 8.17 | 8.40 | 8.63 | 8.79 | 8.88 | 8.93 | 8.96 |
| 50 | 10.00 | 9.69 | 9.72 | 9.98 | 10.27 | 10.49 | 10.62 | 10.69 | 10.73 |
| 52 | 11.9 | 11.5 | 11.5 | 11.8 | 12.1 | 12.4 | 12.6 | 12.7 | 12.8 |
| 54 | 14.0 | 13.5 | 13.5 | 13.8 | 14.2 | 14.6 | 14.9 | 15.0 | 15.1 |
| 56 | 16.5 | 15.9 | 15.8 | 16.1 | 16.6 | 17.1 | 17.4 | 17.6 | 17.7 |
| 58 | 19.3 | 18.5 | 18.4 | 18.7 | 19.3 | 19.8 | 20.3 | 20.5 | 20.7 |
| 60 | 22.4 | 21.5 | 21.3 | 21.6 | 22.3 | 22.9 | 23.5 | 23.8 | 24.0 |
| 62 | 25.9 | 24.9 | 24.6 | 24.9 | 25.6 | 26.4 | 27.0 | 27.5 | 27.7 |
| 64 | 29.9 | 28.6 | 28.2 | 28.5 | 29.3 | 30.2 | 31.0 | 31.6 | 31.9 |
| 66 | 34.3 | 32.8 | 32.3 | 32.6 | 33.4 | 34.4 | 35.4 | 36.1 | 36.5 |
| 68 | 39.2 | 37.5 | 36.8 | 37.1 | 37.9 | 39.1 | 40.2 | 41.1 | 41.6 |
| 70 | 44.6 | 42.7 | 41.9 | 42.1 | 42.9 | 44.2 | 45.5 | 46.6 | 47.3 |
| 72 | 50.6 | 48.4 | 47.5 | 47.6 | 48.5 | 49.9 | 51.4 | 52.6 | 53.5 |
| 74 | 57.3 | 54.7 | 53.6 | 53.6 | 54.6 | 56.1 | 57.7 | 59.2 | 60.3 |
| 76 | 64.6 | 61.7 | 60.4 | 60.3 | 61.2 | 62.8 | 64.7 | 66.4 | 67.7 |
| 78 | 72.5 | 69.3 | 67.8 | 67.7 | 68.6 | 70.2 | 72.3 | 74.3 | 75.8 |
| 80 | 81.3 | 77.6 | 75.9 | 75.7 | 76.6 | 78.3 | 80.6 | 82.8 | 84.7 |
| 82 | 90.9 | 86.7 | 84.7 | 84.4 | 85.3 | 87.1 | 89.6 | 92.1 | 94.2 |
| 84 | 101. | 97. | 94. | 94. | 95. | 97. | 99. | 102. | 105. |
| 86 | 113. | 107. | 105. | 104. | 105. | 107. | 110. | 113. | 116. |
| 88 | 125. | 119. | 116. | 116. | 116. | 118. | 121. | 125. | 128. |
| 90 | 138. | 132. | 129. | 128. | 129. | 131 | 134. | 137. | 141. |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-11

Tabla A-12. LEF's para pavimento rígido, ejes tridem, Pt = 2,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, Pt = 2,0

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 4 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| 6 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 |
| 8 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 10 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 12 | 0.010 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| 14 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| 16 | 0.030 | 0.029 | 0.028 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| 18 | 0.047 | 0.045 | 0.044 | 0.044 | 0.043 | 0.043 | 0.043 | 0.043 | 0.043 | 0.043 |
| 20 | 0.072 | 0.069 | 0.067 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 |
| 22 | 0.105 | 0.101 | 0.099 | 0.098 | 0.097 | 0.097 | 0.097 | 0.097 | 0.097 | 0.097 |
| 24 | 0.149 | 0.144 | 0.141 | 0.139 | 0.139 | 0.138 | 0.138 | 0.138 | 0.138 | 0.138 |
| 26 | 0.205 | 0.199 | 0.195 | 0.194 | 0.193 | 0.192 | 0.192 | 0.192 | 0.192 | 0.192 |
| 28 | 0.276 | 0.270 | 0.265 | 0.263 | 0.262 | 0.262 | 0.262 | 0.262 | 0.262 | 0.261 |
| 30 | 0.364 | 0.359 | 0.354 | 0.351 | 0.350 | 0.349 | 0.349 | 0.349 | 0.349 | 0.349 |
| 32 | 0.472 | 0.468 | 0.463 | 0.460 | 0.459 | 0.458 | 0.458 | 0.458 | 0.458 | 0.458 |
| 34 | 0.603 | 0.600 | 0.596 | 0.594 | 0.593 | 0.592 | 0.592 | 0.592 | 0.592 | 0.592 |
| 36 | 0.759 | 0.758 | 0.757 | 0.756 | 0.755 | 0.755 | 0.755 | 0.755 | 0.755 | 0.755 |
| 38 | 0.946 | 0.947 | 0.949 | 0.950 | 0.951 | 0.951 | 0.951 | 0.951 | 0.951 | 0.951 |
| 40 | 1.17 | 1.17 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.19 |
| 42 | 1.42 | 1.43 | 1.44 | 1.45 | 1.46 | 1.46 | 1.46 | 1.46 | 1.46 | 1.46 |
| 44 | 1.73 | 1.73 | 1.75 | 1.77 | 1.78 | 1.78 | 1.79 | 1.79 | 1.79 | 1.79 |
| 46 | 2.08 | 2.07 | 2.10 | 2.13 | 2.15 | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.17 |
| 48 | 2.48 | 2.47 | 2.51 | 2.55 | 2.58 | 2.59 | 2.80 | 2.60 | 2.61 | 2.61 |
| 50 | 2.95 | 2.92 | 2.97 | 3.03 | 3.07 | 3.09 | 3.10 | 3.11 | 3.11 | 3.11 |
| 52 | 3.48 | 3.44 | 3.50 | 3.58 | 3.63 | 3.66 | 3.68 | 3.69 | 3.69 | 3.69 |
| 54 | 4.09 | 4.03 | 4.09 | 4.20 | 4.27 | 4.31 | 4.33 | 4.35 | 4.35 | 4.35 |
| 56 | 4.78 | 4.69 | 4.76 | 4.89 | 4.99 | 5.05 | 5.08 | 5.09 | 5.10 | 5.10 |
| 58 | 5.57 | 5.44 | 5.51 | 5.66 | 5.79 | 5.87 | 5.91 | 5.94 | 5.95 | 5.95 |
| 60 | 6.45 | 6.29 | 6.35 | 6.53 | 6.69 | 6.79 | 6.85 | 6.88 | 6.90 | 6.90 |
| 62 | 7.43 | 7.23 | 7.28 | 7.49 | 7.69 | 7.82 | 7.90 | 7.94 | 7.97 | 7.97 |
| 64 | 8.54 | 8.28 | 8.32 | 8.55 | 8.80 | 8.97 | 9.07 | 9.13 | 9.16 | 9.16 |
| 66 | 9.76 | 9.46 | 9.48 | 9.73 | 10.02 | 10.24 | 10.37 | 10.44 | 10.48 | 10.48 |
| 68 | 11.1 | 10.8 | 10.8 | 11.0 | 11.4 | 11.6 | 11.8 | 11.9 | 12.0 | 12.0 |
| 70 | 12.6 | 12.2 | 12.2 | 12.5 | 12.8 | 13.2 | 13.4 | 13.5 | 13.6 | 13.6 |
| 72 | 14.3 | 13.8 | 13.7 | 14.0 | 14.5 | 14.9 | 15.1 | 15.3 | 15.4 | 15.4 |
| 74 | 16.1 | 15.5 | 15.4 | 15.7 | 16.2 | 16.7 | 17.0 | 17.2 | 17.3 | 17.3 |
| 76 | 18.2 | 17.5 | 17.3 | 17.6 | 18.2 | 18.7 | 19.1 | 19.3 | 19.5 | 19.5 |
| 78 | 20.4 | 19.6 | 19.4 | 19.7 | 20.3 | 20.9 | 21.4 | 21.7 | 21.8 | 21.8 |
| 80 | 22.8 | 21.9 | 21.6 | 21.9 | 22.6 | 23.3 | 23.8 | 24.2 | 24.4 | 24.4 |
| 82 | 25.4 | 24.4 | 24.1 | 24.4 | 25.0 | 25.8 | 26.5 | 26.9 | 27.2 | 27.2 |
| 84 | 28.3 | 27.1 | 26.7 | 27.0 | 27.7 | 28.6 | 29.4 | 29.9 | 30.2 | 30.2 |
| 86 | 31.4 | 30.1 | 29.6 | 29.9 | 30.7 | 31.6 | 32.5 | 33.1 | 33.5 | 33.5 |
| 88 | 34.8 | 33.3 | 32.8 | 33.0 | 33.8 | 34.8 | 35.8 | 36.6 | 37.1 | 37.1 |
| 90 | 38.5 | 36.8 | 36.2 | 36.4 | 37.2 | 38.3 | 39.4 | 40.3 | 40.9 | 40.9 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-12

Tabla A-13. LEF's para pavimento rígido, ejes simples, Pt = 2,5

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, Pt = 2,5

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| 4 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 6 | 0.012 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 8 | 0.039 | 0.035 | 0.033 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 |
| 10 | 0.097 | 0.089 | 0.084 | 0.082 | 0.081 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 12 | 0.203 | 0.189 | 0.181 | 0.176 | 0.175 | 0.174 | 0.174 | 0.173 | 0.173 |
| 14 | 0.376 | 0.360 | 0.347 | 0.341 | 0.338 | 0.337 | 0.336 | 0.336 | 0.336 |
| 16 | 0.634 | 0.623 | 0.610 | 0.604 | 0.601 | 0.599 | 0.599 | 0.599 | 0.598 |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20 | 1.51 | 1.52 | 1.55 | 1.57 | 1.58 | 1.58 | 1.59 | 1.59 | 1.59 |
| 22 | 2.21 | 2.20 | 2.28 | 2.34 | 2.38 | 2.40 | 2.41 | 2.41 | 2.41 |
| 24 | 3.16 | 3.10 | 3.22 | 3.36 | 3.45 | 3.50 | 3.53 | 3.54 | 3.55 |
| 26 | 4.41 | 4.26 | 4.42 | 4.67 | 4.85 | 4.95 | 5.01 | 5.04 | 5.05 |
| 28 | 6.05 | 5.76 | 5.92 | 6.29 | 6.61 | 6.81 | 6.92 | 6.98 | 7.01 |
| 30 | 8.16 | 7.67 | 7.79 | 8.28 | 8.79 | 9.14 | 9.35 | 9.46 | 9.52 |
| 32 | 10.8 | 10.1 | 10.1 | 10.7 | 11.4 | 12.0 | 12.3 | 12.6 | 12.7 |
| 34 | 14.1 | 13.0 | 12.9 | 13.6 | 14.6 | 15.4 | 16.0 | 16.4 | 16.5 |
| 36 | 18.2 | 16.7 | 16.4 | 17.1 | 18.3 | 19.5 | 20.4 | 21.0 | 21.3 |
| 38 | 23.1 | 21.1 | 20.6 | 21.3 | 22.7 | 24.3 | 25.6 | 26.4 | 27.0 |
| 40 | 29.1 | 26.5 | 25.7 | 26.3 | 27.9 | 29.9 | 31.6 | 32.9 | 33.7 |
| 42 | 36.2 | 32.9 | 31.7 | 32.2 | 34.0 | 36.3 | 38.7 | 40.4 | 41.6 |
| 44 | 44.6 | 40.4 | 38.8 | 39.2 | 41.0 | 43.8 | 46.7 | 49.1 | 50.8 |
| 46 | 54.5 | 49.3 | 47.1 | 47.3 | 49.2 | 52.3 | 55.9 | 59.0 | 61.4 |
| 48 | 66.1 | 59.7 | 56.9 | 56.8 | 58.7 | 62.1 | 66.3 | 70.3 | 73.4 |
| 50 | 79.4 | 71.7 | 68.2 | 67.8 | 69.6 | 73.3 | 78.1 | 83.0 | 87.1 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-13

Tabla A-14. LEF's para pavimento rígido, ejes tándem, Pt = 2,5

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, Pt = 2,5

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 4 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| 6 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 8 | 0.007 | 0.006 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 10 | 0.015 | 0.014 | 0.013 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| 12 | 0.031 | 0.028 | 0.026 | 0.026 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| 14 | 0.057 | 0.052 | 0.049 | 0.048 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 |
| 16 | 0.097 | 0.089 | 0.084 | 0.082 | 0.081 | 0.081 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 18 | 0.155 | 0.143 | 0.136 | 0.133 | 0.132 | 0.131 | 0.131 | 0.131 | 0.131 |
| 20 | 0.234 | 0.220 | 0.211 | 0.206 | 0.204 | 0.203 | 0.203 | 0.203 | 0.203 |
| 22 | 0.340 | 0.325 | 0.313 | 0.308 | 0.305 | 0.304 | 0.303 | 0.303 | 0.303 |
| 24 | 0.475 | 0.462 | 0.450 | 0.444 | 0.441 | 0.440 | 0.439 | 0.439 | 0.439 |
| 26 | 0.644 | 0.637 | 0.627 | 0.622 | 0.620 | 0.619 | 0.618 | 0.618 | 0.618 |
| 28 | 0.855 | 0.854 | 0.852 | 0.850 | 0.850 | 0.850 | 0.849 | 0.849 | 0.849 |
| 30 | 1.11 | 1.12 | 1.13 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 |
| 32 | 1.43 | 1.44 | 1.47 | 1.49 | 1.50 | 1.51 | 1.51 | 1.51 | 1.51 |
| 34 | 1.82 | 1.82 | 1.87 | 1.92 | 1.95 | 1.96 | 1.97 | 1.97 | 1.97 |
| 36 | 2.29 | 2.27 | 2.35 | 2.43 | 2.48 | 2.51 | 2.52 | 2.52 | 2.53 |
| 38 | 2.85 | 2.80 | 2.91 | 3.03 | 3.12 | 3.16 | 3.18 | 3.20 | 3.20 |
| 40 | 3.52 | 3.42 | 3.55 | 3.74 | 3.87 | 3.94 | 3.98 | 4.00 | 4.01 |
| 42 | 4.32 | 4.16 | 4.30 | 4.55 | 4.74 | 4.86 | 4.91 | 4.95 | 4.96 |
| 44 | 5.26 | 5.01 | 5.16 | 5.48 | 5.75 | 5.92 | 6.01 | 6.06 | 6.09 |
| 46 | 6.36 | 6.01 | 6.14 | 6.53 | 6.90 | 7.14 | 7.28 | 7.36 | 7.40 |
| 48 | 7.64 | 7.16 | 7.27 | 7.73 | 8.21 | 8.55 | 8.75 | 8.86 | 8.92 |
| 50 | 9.11 | 8.50 | 8.55 | 9.07 | 9.68 | 10.14 | 10.42 | 10.58 | 10.66 |
| 52 | 10.8 | 10.0 | 10.0 | 10.6 | 11.3 | 11.9 | 12.3 | 12.5 | 12.7 |
| 54 | 12.8 | 11.8 | 11.7 | 12.3 | 13.2 | 13.9 | 14.5 | 14.8 | 14.9 |
| 56 | 15.0 | 13.8 | 13.6 | 14.2 | 15.2 | 16.2 | 16.8 | 17.3 | 17.5 |
| 58 | 17.5 | 16.0 | 15.7 | 16.3 | 17.5 | 18.6 | 19.5 | 20.1 | 20.4 |
| 60 | 20.3 | 18.5 | 18.1 | 18.7 | 20.0 | 21.4 | 22.5 | 23.2 | 23.6 |
| 62 | 23.5 | 21.4 | 20.8 | 21.4 | 22.8 | 24.4 | 25.7 | 26.7 | 27.3 |
| 64 | 27.0 | 24.6 | 23.8 | 24.4 | 25.8 | 27.7 | 29.3 | 30.5 | 31.3 |
| 66 | 31.0 | 28.1 | 27.1 | 27.6 | 29.2 | 31.3 | 33.2 | 34.7 | 35.7 |
| 68 | 35.4 | 32.1 | 30.9 | 31.3 | 32.9 | 35.2 | 37.5 | 39.3 | 40.5 |
| 70 | 40.3 | 36.5 | 35.0 | 35.3 | 37.0 | 39.5 | 42.1 | 44.3 | 45.9 |
| 72 | 45.7 | 41.4 | 39.6 | 39.8 | 41.5 | 44.2 | 47.2 | 49.8 | 51.7 |
| 74 | 51.7 | 46.7 | 44.6 | 44.7 | 46.4 | 49.3 | 52.7 | 55.7 | 58.0 |
| 76 | 58.3 | 52.6 | 50.2 | 50.1 | 51.8 | 54.9 | 58.6 | 62.1 | 64.8 |
| 78 | 65.5 | 59.1 | 56.3 | 56.1 | 57.7 | 60.9 | 65.0 | 69.0 | 72.3 |
| 80 | 73.4 | 66.2 | 62.9 | 62.5 | 64.2 | 67.5 | 71.9 | 76.4 | 80.2 |
| 82 | 82.0 | 73.9 | 70.2 | 69.6 | 71.2 | 74.7 | 79.4 | 84.4 | 88.8 |
| 84 | 91.4 | 82.4 | 78.1 | 77.3 | 78.9 | 82.4 | 87.4 | 93.0 | 98.1 |
| 86 | 102. | 92. | 87. | 86. | 87. | 91. | 96. | 102. | 108. |
| 88 | 113. | 102. | 96. | 95. | 96. | 100. | 105. | 112. | 119. |
| 90 | 125. | 112. | 106. | 105. | 106. | 110. | 115. | 123. | 130. |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-14

Tabla A-15. LEF's para pavimento rígido, ejes tridem, Pt = 2,5

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, Pt = 2,5

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 4 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| 6 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 8 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 10 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 12 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| 14 | 0.020 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| 16 | 0.033 | 0.030 | 0.029 | 0.028 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| 18 | 0.053 | 0.048 | 0.045 | 0.044 | 0.044 | 0.043 | 0.043 | 0.043 | 0.043 |
| 20 | 0.080 | 0.073 | 0.069 | 0.067 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 |
| 22 | 0.116 | 0.107 | 0.101 | 0.099 | 0.098 | 0.097 | 0.097 | 0.097 | 0.097 |
| 24 | 0.163 | 0.151 | 0.144 | 0.141 | 0.139 | 0.139 | 0.138 | 0.138 | 0.138 |
| 26 | 0.222 | 0.209 | 0.200 | 0.195 | 0.194 | 0.193 | 0.192 | 0.192 | 0.192 |
| 28 | 0.295 | 0.281 | 0.271 | 0.265 | 0.263 | 0.262 | 0.262 | 0.262 | 0.262 |
| 30 | 0.384 | 0.371 | 0.359 | 0.354 | 0.351 | 0.350 | 0.349 | 0.349 | 0.349 |
| 32 | 0.490 | 0.480 | 0.468 | 0.463 | 0.460 | 0.459 | 0.458 | 0.458 | 0.458 |
| 34 | 0.616 | 0.609 | 0.601 | 0.596 | 0.594 | 0.593 | 0.592 | 0.592 | 0.592 |
| 36 | 0.765 | 0.762 | 0.759 | 0.757 | 0.756 | 0.755 | 0.755 | 0.755 | 0.755 |
| 38 | 0.939 | 0.941 | 0.946 | 0.948 | 0.950 | 0.951 | 0.951 | 0.951 | 0.951 |
| 40 | 1.14 | 1.15 | 1.16 | 1.17 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 |
| 42 | 1.38 | 1.38 | 1.41 | 1.44 | 1.45 | 1.46 | 1.46 | 1.46 | 1.46 |
| 44 | 1.65 | 1.65 | 1.70 | 1.74 | 1.77 | 1.78 | 1.78 | 1.78 | 1.79 |
| 46 | 1.97 | 1.96 | 2.03 | 2.09 | 2.13 | 2.15 | 2.16 | 2.16 | 2.16 |
| 48 | 2.34 | 2.31 | 2.40 | 2.49 | 2.55 | 2.58 | 2.59 | 2.60 | 2.60 |
| 50 | 2.76 | 2.71 | 2.81 | 2.94 | 3.02 | 3.07 | 3.09 | 3.10 | 3.11 |
| 52 | 3.24 | 3.15 | 3.27 | 3.44 | 3.56 | 3.62 | 3.66 | 3.68 | 3.68 |
| 54 | 3.79 | 3.66 | 3.79 | 4.00 | 4.16 | 4.26 | 4.30 | 4.33 | 4.34 |
| 56 | 4.41 | 4.23 | 4.37 | 4.63 | 4.84 | 4.97 | 5.03 | 5.07 | 5.09 |
| 58 | 5.12 | 4.87 | 5.00 | 5.32 | 5.59 | 5.76 | 5.85 | 5.90 | 5.93 |
| 60 | 5.91 | 5.59 | 5.71 | 6.08 | 6.42 | 6.64 | 6.77 | 6.84 | 6.87 |
| 62 | 6.80 | 6.39 | 6.50 | 6.91 | 7.33 | 7.62 | 7.79 | 7.88 | 7.93 |
| 64 | 7.79 | 7.29 | 7.37 | 7.82 | 8.33 | 8.70 | 8.92 | 9.04 | 9.11 |
| 66 | 8.90 | 8.28 | 8.33 | 8.83 | 9.42 | 9.88 | 10.17 | 10.33 | 10.42 |
| 68 | 10.1 | 9.4 | 9.4 | 9.9 | 10.6 | 11.2 | 11.5 | 11.7 | 11.9 |
| 70 | 11.5 | 10.6 | 10.6 | 11.1 | 11.9 | 12.6 | 13.0 | 13.3 | 13.5 |
| 72 | 13.0 | 12.0 | 11.8 | 12.4 | 13.3 | 14.1 | 14.7 | 15.0 | 15.2 |
| 74 | 14.6 | 13.5 | 13.2 | 13.8 | 14.8 | 15.8 | 16.5 | 16.9 | 17.1 |
| 76 | 16.5 | 15.1 | 14.8 | 15.4 | 16.5 | 17.6 | 18.4 | 18.9 | 19.2 |
| 78 | 18.5 | 16.9 | 16.5 | 17.1 | 18.2 | 19.5 | 20.5 | 21.1 | 21.5 |
| 80 | 20.6 | 18.8 | 18.3 | 18.9 | 20.2 | 21.6 | 22.7 | 23.5 | 24.0 |
| 82 | 23.0 | 21.0 | 20.3 | 20.9 | 22.2 | 23.8 | 25.2 | 26.1 | 26.7 |
| 84 | 25.6 | 23.3 | 22.5 | 23.1 | 24.5 | 26.2 | 27.8 | 28.9 | 29.6 |
| 86 | 28.4 | 25.8 | 24.9 | 25.4 | 26.9 | 28.8 | 30.5 | 31.9 | 32.8 |
| 88 | 31.5 | 28.6 | 27.5 | 27.9 | 29.4 | 31.5 | 33.5 | 35.1 | 36.1 |
| 90 | 34.8 | 31.5 | 30.7 | 30.7 | 32.2 | 34.4 | 36.7 | 38.5 | 39.8 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-15

Tabla A-16. LEF's para pavimento rígido, ejes simples, Pt = 3,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, Pt = 3,0

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| 4 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 6 | 0.014 | 0.012 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 8 | 0.045 | 0.038 | 0.034 | 0.033 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 | 0.032 |
| 10 | 0.111 | 0.095 | 0.087 | 0.083 | 0.081 | 0.081 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 12 | 0.228 | 0.202 | 0.186 | 0.179 | 0.176 | 0.174 | 0.174 | 0.174 | 0.173 |
| 14 | 0.408 | 0.378 | 0.355 | 0.344 | 0.340 | 0.337 | 0.337 | 0.337 | 0.337 |
| 16 | 0.660 | 0.640 | 0.619 | 0.608 | 0.603 | 0.600 | 0.599 | 0.599 | 0.599 |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20 | 1.46 | 1.47 | 1.52 | 1.55 | 1.57 | 1.58 | 1.58 | 1.59 | 1.59 |
| 22 | 2.07 | 2.06 | 2.18 | 2.29 | 2.35 | 2.38 | 2.40 | 2.41 | 2.41 |
| 24 | 2.90 | 2.81 | 3.00 | 3.23 | 3.38 | 3.47 | 3.51 | 2.53 | 3.54 |
| 26 | 4.00 | 3.77 | 4.01 | 4.40 | 4.70 | 4.87 | 4.96 | 5.01 | 5.04 |
| 28 | 5.43 | 4.99 | 5.23 | 5.80 | 6.31 | 6.65 | 6.83 | 6.93 | 6.98 |
| 30 | 7.27 | 6.53 | 6.72 | 7.46 | 8.25 | 8.83 | 9.17 | 9.36 | 9.46 |
| 32 | 9.59 | 8.47 | 8.53 | 9.42 | 10.54 | 11.44 | 12.03 | 12.37 | 12.56 |
| 34 | 12.5 | 10.9 | 10.7 | 11.7 | 13.2 | 14.5 | 15.5 | 16.0 | 16.4 |
| 36 | 16.0 | 13.8 | 13.4 | 14.4 | 16.2 | 18.1 | 19.5 | 20.4 | 21.0 |
| 38 | 20.4 | 17.4 | 16.7 | 17.7 | 19.8 | 22.2 | 24.2 | 25.6 | 26.4 |
| 40 | 25.6 | 21.8 | 20.6 | 21.5 | 23.8 | 26.8 | 29.5 | 31.5 | 32.9 |
| 42 | 31.8 | 26.9 | 25.3 | 26.0 | 28.5 | 32.0 | 36.5 | 38.4 | 40.3 |
| 44 | 39.2 | 33.1 | 30.8 | 31.3 | 33.9 | 37.9 | 42.3 | 46.1 | 48.8 |
| 46 | 47.8 | 40.3 | 37.2 | 37.5 | 40.1 | 44.5 | 49.8 | 54.7 | 58.5 |
| 48 | 57.9 | 48.6 | 44.8 | 44.7 | 47.3 | 52.1 | 48.2 | 64.3 | 69.4 |
| 50 | 69.6 | 58.4 | 53.6 | 53.1 | 55.6 | 60.6 | 67.6 | 75.0 | 81.4 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-16

Tabla A-17. LEF's para pavimento rígido, ejes tándem, Pt = 3,0

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, Pt = 3,0

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 4 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| 6 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 8 | 0.008 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| 10 | 0.018 | 0.015 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| 12 | 0.036 | 0.030 | 0.027 | 0.026 | 0.026 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| 14 | 0.066 | 0.056 | 0.050 | 0.048 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 |
| 16 | 0.111 | 0.095 | 0.087 | 0.083 | 0.081 | 0.081 | 0.081 | 0.081 | 0.080 |
| 18 | 0.174 | 0.153 | 0.140 | 0.135 | 0.132 | 0.131 | 0.131 | 0.131 | 0.131 |
| 20 | 0.260 | 0.234 | 0.217 | 0.209 | 0.205 | 0.204 | 0.203 | 0.203 | 0.203 |
| 22 | 0.368 | 0.341 | 0.321 | 0.311 | 0.307 | 0.305 | 0.304 | 0.303 | 0.303 |
| 24 | 0.502 | 0.479 | 0.458 | 0.447 | 0.443 | 0.440 | 0.440 | 0.439 | 0.439 |
| 26 | 0.664 | 0.651 | 0.634 | 0.625 | 0.621 | 0.619 | 0.618 | 0.618 | 0.618 |
| 28 | 0.859 | 0.857 | 0.853 | 0.851 | 0.850 | 0.850 | 0.850 | 0.849 | 0.849 |
| 30 | 1.09 | 1.10 | 1.12 | 1.13 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 |
| 32 | 1.38 | 1.38 | 1.44 | 1.47 | 1.49 | 1.50 | 1.51 | 1.51 | 1.51 |
| 34 | 1.72 | 1.71 | 1.80 | 1.88 | 1.93 | 1.95 | 1.96 | 1.97 | 1.97 |
| 36 | 2.13 | 2.10 | 2.23 | 2.36 | 2.45 | 2.49 | 2.51 | 2.52 | 2.52 |
| 38 | 2.62 | 2.54 | 2.71 | 2.92 | 3.06 | 3.13 | 3.17 | 3.19 | 3.20 |
| 40 | 3.21 | 3.05 | 3.26 | 3.55 | 3.76 | 3.89 | 3.95 | 3.98 | 4.00 |
| 42 | 3.90 | 3.65 | 3.87 | 4.26 | 4.58 | 4.77 | 4.87 | 4.92 | 4.95 |
| 44 | 4.72 | 4.35 | 4.57 | 5.06 | 5.50 | 5.78 | 5.94 | 6.02 | 6.06 |
| 46 | 5.68 | 5.16 | 5.36 | 5.95 | 6.54 | 6.94 | 7.17 | 7.29 | 7.36 |
| 48 | 6.80 | 6.10 | 6.25 | 6.93 | 7.69 | 8.24 | 8.57 | 8.76 | 8.86 |
| 50 | 8.09 | 7.17 | 7.26 | 8.03 | 8.96 | 9.70 | 10.17 | 10.43 | 10.58 |
| 52 | 9.57 | 8.41 | 8.40 | 9.24 | 10.36 | 11.32 | 11.96 | 12.33 | 12.54 |
| 54 | 11.3 | 9.8 | 9.7 | 10.6 | 11.9 | 13.1 | 14.0 | 14.5 | 14.8 |
| 56 | 13.2 | 11.4 | 11.2 | 12.1 | 13.6 | 15.1 | 16.2 | 16.9 | 17.3 |
| 58 | 15.4 | 13.2 | 12.8 | 13.7 | 15.4 | 17.2 | 18.6 | 19.5 | 20.1 |
| 60 | 17.9 | 15.3 | 14.7 | 15.6 | 17.4 | 19.5 | 21.3 | 22.5 | 23.2 |
| 62 | 20.6 | 17.6 | 16.8 | 17.6 | 19.6 | 22.0 | 24.1 | 25.7 | 26.6 |
| 64 | 23.7 | 20.2 | 19.1 | 19.9 | 22.0 | 24.7 | 27.3 | 29.2 | 30.4 |
| 66 | 27.2 | 23.1 | 21.7 | 22.4 | 24.6 | 27.6 | 30.6 | 33.0 | 34.6 |
| 68 | 31.1 | 26.3 | 24.6 | 25.2 | 27.4 | 30.8 | 34.3 | 37.1 | 39.2 |
| 70 | 35.4 | 29.8 | 27.8 | 28.2 | 30.6 | 34.2 | 38.2 | 41.6 | 44.1 |
| 72 | 40.1 | 33.8 | 31.3 | 31.6 | 34.0 | 37.9 | 42.3 | 46.4 | 49.4 |
| 74 | 45.3 | 38.1 | 35.2 | 35.4 | 37.7 | 41.8 | 46.8 | 51.5 | 55.2 |
| 76 | 51.1 | 42.9 | 39.5 | 39.5 | 41.8 | 46.1 | 51.5 | 56.9 | 61.3 |
| 78 | 57.4 | 48.2 | 44.3 | 44.0 | 46.3 | 50.7 | 56.5 | 62.7 | 67.9 |
| 80 | 64.3 | 53.9 | 49.4 | 48.9 | 51.1 | 55.8 | 62.1 | 68.9 | 74.9 |
| 82 | 71.8 | 60.2 | 55.1 | 54.3 | 56.5 | 61.2 | 67.9 | 75.5 | 82.4 |
| 84 | 80.0 | 67.0 | 61.2 | 60.2 | 62.2 | 67.0 | 74.2 | 82.4 | 90.3 |
| 86 | 89.0 | 74.5 | 67.9 | 66.5 | 68.5 | 73.4 | 80.8 | 89.8 | 98.7 |
| 88 | 98.7 | 82.5 | 75.2 | 73.5 | 75.3 | 80.2 | 88.0 | 97.7 | 107.5 |
| 90 | 109. | 91. | 83. | 81. | 83. | 88. | 96. | 106. | 117. |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-17

Tabla A-18. LEF's para pavimento rígido, ejes tridem, $P_t = 3,0$

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, $P_t = 3,0$

| Carga p/eje (kips) | Espesor de losa D (en pulgadas) | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 2 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| 4 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| 6 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 8 | 0.003 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 10 | 0.007 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| 12 | 0.013 | 0.011 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |
| 14 | 0.023 | 0.02 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| 16 | 0.039 | 0.033 | 0.030 | 0.028 | 0.028 | 0.027 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| 18 | 0.061 | 0.052 | 0.047 | 0.045 | 0.044 | 0.044 | 0.043 | 0.043 | 0.043 |
| 20 | 0.091 | 0.078 | 0.071 | 0.068 | 0.067 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.066 |
| 22 | 0.132 | 0.114 | 0.104 | 0.100 | 0.098 | 0.097 | 0.097 | 0.097 | 0.097 |
| 24 | 0.183 | 0.161 | 0.148 | 0.143 | 0.140 | 0.139 | 0.139 | 0.138 | 0.138 |
| 26 | 0.246 | 0.221 | 0.205 | 0.198 | 0.195 | 0.193 | 0.193 | 0.192 | 0.192 |
| 28 | 0.322 | 0.296 | 0.277 | 0.268 | 0.265 | 0.263 | 0.262 | 0.262 | 0.262 |
| 30 | 0.411 | 0.387 | 0.367 | 0.357 | 0.353 | 0.351 | 0.350 | 0.349 | 0.349 |
| 32 | 0.515 | 0.495 | 0.476 | 0.466 | 0.462 | 0.460 | 0.459 | 0.458 | 0.458 |
| 34 | 0.634 | 0.622 | 0.607 | 0.599 | 0.595 | 0.594 | 0.593 | 0.592 | 0.592 |
| 36 | 0.772 | 0.768 | 0.762 | 0.759 | 0.756 | 0.756 | 0.755 | 0.755 | 0.755 |
| 38 | 0.930 | 0.934 | 0.942 | 0.947 | 0.949 | 0.950 | 0.951 | 0.951 | 0.951 |
| 40 | 1.11 | 1.12 | 1.15 | 1.17 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.18 |
| 42 | 1.32 | 1.33 | 1.38 | 1.42 | 1.44 | 1.45 | 1.46 | 1.46 | 1.46 |
| 44 | 1.56 | 1.56 | 1.64 | 1.71 | 1.75 | 1.77 | 1.78 | 1.78 | 1.78 |
| 46 | 1.84 | 1.83 | 1.94 | 2.04 | 2.10 | 2.14 | 2.15 | 2.16 | 2.16 |
| 48 | 2.16 | 2.12 | 2.26 | 2.41 | 2.51 | 2.56 | 2.58 | 2.59 | 2.60 |
| 50 | 2.53 | 2.45 | 2.61 | 2.82 | 2.96 | 3.03 | 3.07 | 3.09 | 3.10 |
| 52 | 2.95 | 2.82 | 3.01 | 3.27 | 3.47 | 3.58 | 3.63 | 3.66 | 3.68 |
| 54 | 3.43 | 3.23 | 3.43 | 3.77 | 4.03 | 4.18 | 4.27 | 4.31 | 4.33 |
| 56 | 3.98 | 3.70 | 3.90 | 4.31 | 4.65 | 4.86 | 4.98 | 5.04 | 5.07 |
| 58 | 4.59 | 4.22 | 4.42 | 4.90 | 5.34 | 5.62 | 5.78 | 5.86 | 5.90 |
| 60 | 5.28 | 4.80 | 4.99 | 5.54 | 6.08 | 6.45 | 6.66 | 6.78 | 6.84 |
| 62 | 6.06 | 5.45 | 5.61 | 6.23 | 6.89 | 7.36 | 7.64 | 7.80 | 7.88 |
| 64 | 6.92 | 6.18 | 6.29 | 6.98 | 7.76 | 8.36 | 8.72 | 8.93 | 9.04 |
| 66 | 7.89 | 6.98 | 7.05 | 7.78 | 8.70 | 9.44 | 9.91 | 10.18 | 10.33 |
| 68 | 8.96 | 7.88 | 7.87 | 8.66 | 9.71 | 10.61 | 11.20 | 11.55 | 11.75 |
| 70 | 10.2 | 8.9 | 8.8 | 9.6 | 10.8 | 11.9 | 12.6 | 13.1 | 13.3 |
| 72 | 11.5 | 10.0 | 9.8 | 10.6 | 12.0 | 13.2 | 14.1 | 14.7 | 15.0 |
| 74 | 12.9 | 11.2 | 10.9 | 11.7 | 13.2 | 14.7 | 15.8 | 16.5 | 16.9 |
| 76 | 14.5 | 12.5 | 12.1 | 12.9 | 14.5 | 16.2 | 17.5 | 18.4 | 18.9 |
| 78 | 16.2 | 13.9 | 13.4 | 14.2 | 15.9 | 17.8 | 19.4 | 20.5 | 21.1 |
| 80 | 18.2 | 15.5 | 14.8 | 15.6 | 17.4 | 19.6 | 21.4 | 22.7 | 23.5 |
| 82 | 20.2 | 17.2 | 16.4 | 17.2 | 19.1 | 21.4 | 23.5 | 25.1 | 26.1 |
| 84 | 22.5 | 19.1 | 18.1 | 18.8 | 20.8 | 23.4 | 25.8 | 27.6 | 28.8 |
| 86 | 25.0 | 21.2 | 19.9 | 20.6 | 22.6 | 25.5 | 28.2 | 30.4 | 31.8 |
| 88 | 27.6 | 23.4 | 21.9 | 22.5 | 24.6 | 27.7 | 30.7 | 33.2 | 35.0 |
| 90 | 30.5 | 25.8 | 24.1 | 24.6 | 26.8 | 30.0 | 33.4 | 36.3 | 38.3 |

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Tabla D-18

ANEXOS



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21049

INFORME No.: 215 S.S.

O.T.: 27,090

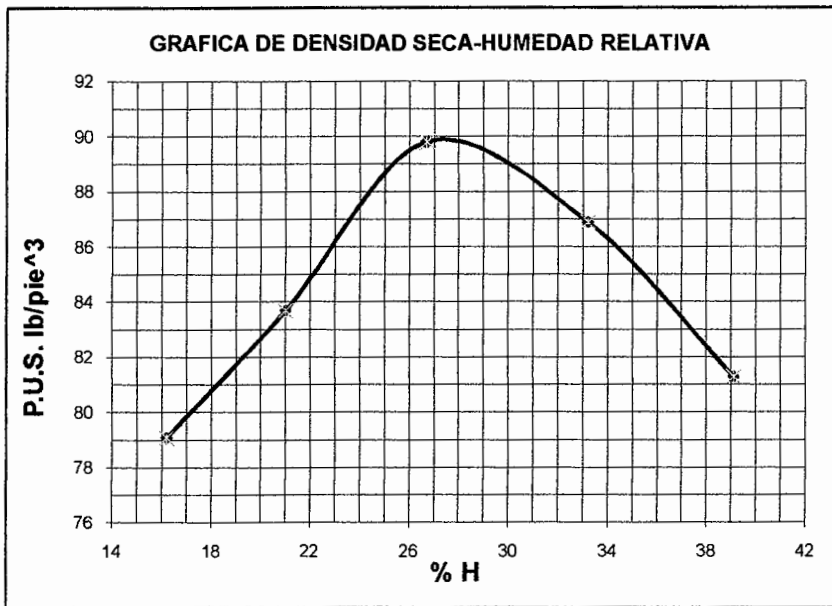
Interesado: Heber Esaú De León López
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Proctor Estándar: () Norma:
Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.

Ubicación: Km. 28 carretera El Salvador

Fecha: 16 de julio de 2010



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café claro
 Densidad seca máxima γ_d : 1442 Kg/m³ 90.0 lb/pe³
 Humedad óptima Hop.: 27.5 %
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar E. Medina Mendez
Ing. Omar Enrique Medina Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



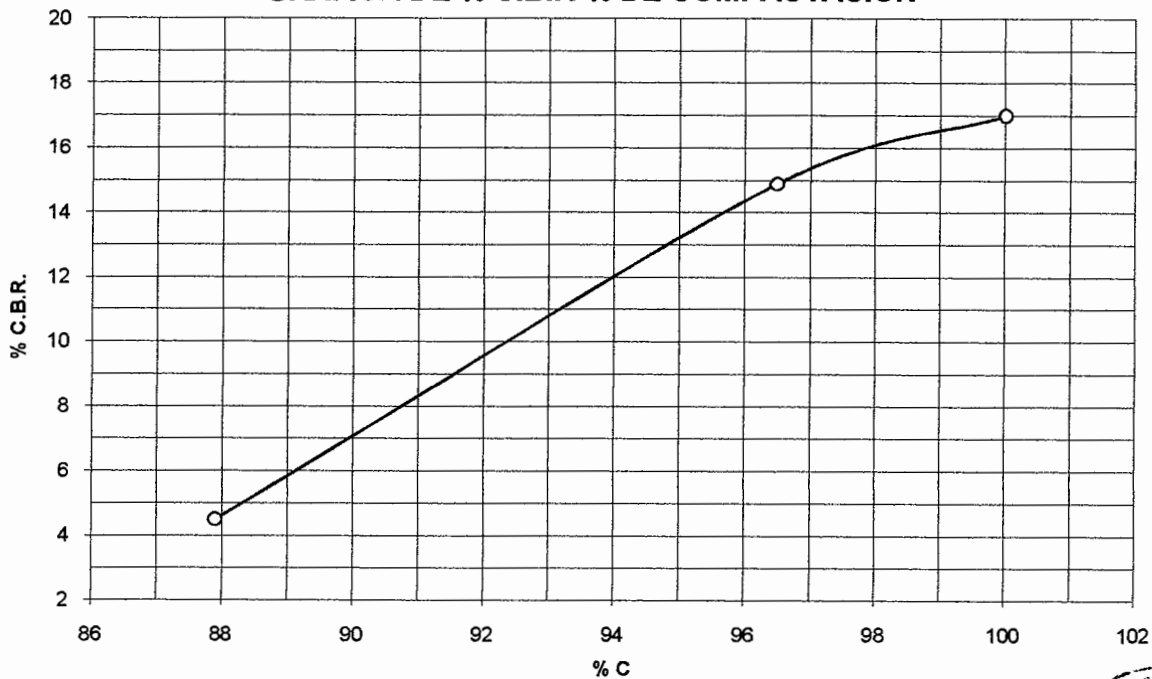
Nº 21050

INFORME No.: 216 S.S. O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193
 Proyecto: Gufa para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.
 Ubicación: Km. 28 carretera El Salvador
 Descripción del suelo: Limo arcilloso color café claro
 Fecha: 16 de julio de 2010

| PROBETA No. | GOLPES No. | A LA COMPACTACION | | C (%) | EXPANSION (%) | C.B.R. (%) |
|-------------|------------|-------------------|--------------------------------|-------|---------------|------------|
| | | H (%) | γ_d Lb/pie ³ | | | |
| 18 | 10 | 28.6 | 79.1 | 87.9 | 2.17 | 4.5 |
| 17 | 30 | 28.6 | 86.8 | 96.5 | 2.35 | 14.9 |
| 8 | 65 | 28.6 | 90.0 | 100.0 | 2.61 | 17.0 |

GRAFICA DE % C.B.R.-% DE COMPACTACION



Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Carrillo
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21052

INFORME No. 218 S.S.

O.T. No. 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.

Norma: A.A.S.H.T.O. T-27, T-11

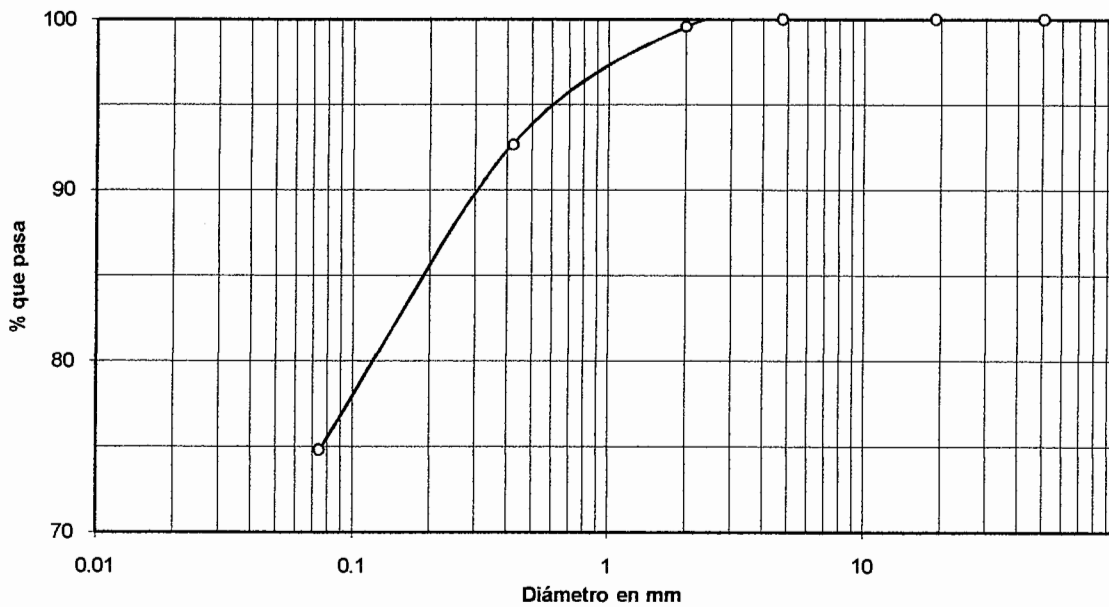
Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.

Procedencia: Km. 28 carretera El Salvador

Fecha: 16 de julio de 2010

| Análisis con Tamices: | | |
|-----------------------|---------------|------------|
| Tamiz | Abertura (mm) | % que pasa |
| 2" | 50.8 | 100.00 |
| 3/4" | 19.00 | 100.00 |
| 4 | 4.76 | 100.00 |
| 10 | 2.00 | 99.60 |
| 40 | 0.42 | 92.70 |
| 200 | 0.074 | 74.80 |

% de Grava: 0.00
% de Arena: 25.20
% de Finos: 74.80



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café claro
Clasificación: S.C.U.: ML P.R.A.: A - 5
Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano M...
DIRECTORA CII/USAC



Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21051

INFORME No. 217 S. S.

O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú DeLeón López

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Km. 28 carretera El Salvador

FECHA: 16 de julio de 2010

RESULTADOS:

| ENSAYO No. | MUESTRA No. | L.L. (%) | I.P. (%) | C.S.U. * | DESCRIPCION DEL SUELO |
|------------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 47.1 | 10.2 | ML | Limo arcilloso color café claro |

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21065

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, MODULO DE RESILIENCIA

INFORME No.: 231 S.S. O.T.: 27,090

INTERESADO: Heber Esaú De León López
 PROYECTO: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.
 UBICACIÓN: Km. 28 carretera El Salvador Fecha: 16 de julio de 2010.
 Proporción: x Profundidad: 0.50 m Muestra: 1

| | |
|--|---|
| MODULO DE RESILIENCIA: 10,559 psi | DEFORMACION UNITARIA REMANENTE: 0.0056 |
|--|---|

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Limo arcilloso color café claro
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

| | |
|---|-------|
| PROBETA No. | 1 |
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 10 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(psi) | 59.13 |
| PRESION INTERSTICIAL u(T/m ²) | x |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 1.32 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.75 |
| HUMEDAD (%H) | 32.2 |

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Mora
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21053

INFORME No.: 219 S.S.

O.T.: 27,090

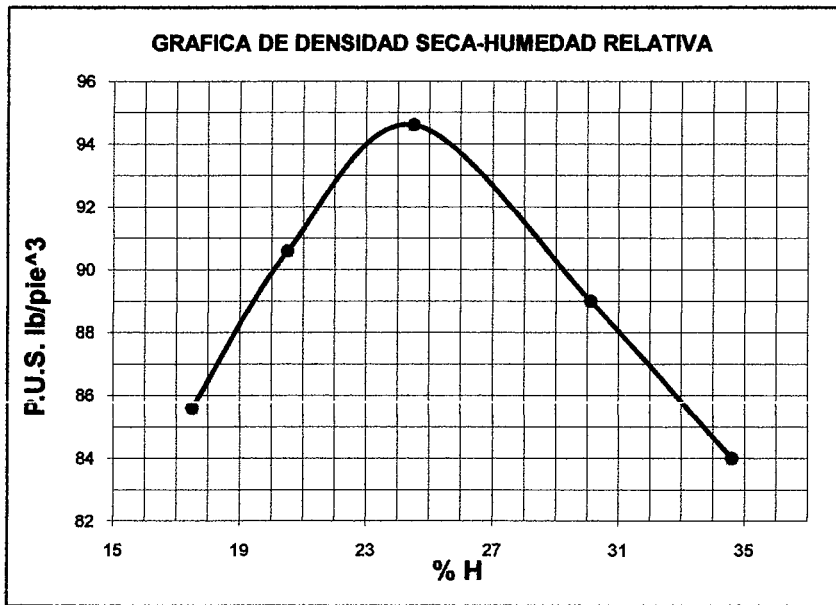
Interesado: Heber Esaú De León López
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Proctor Estándar: () Norma:
Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Ubicación: Km. 26 carretera a El Salvador

Fecha: 16 de julio de 2010



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café con gravilla
 Densidad seca máxima γ_d : 1515 Kg/m³ 94.6 lb/pe³
 Humedad óptima Hop.: 24.2 %
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Meléndez
 DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



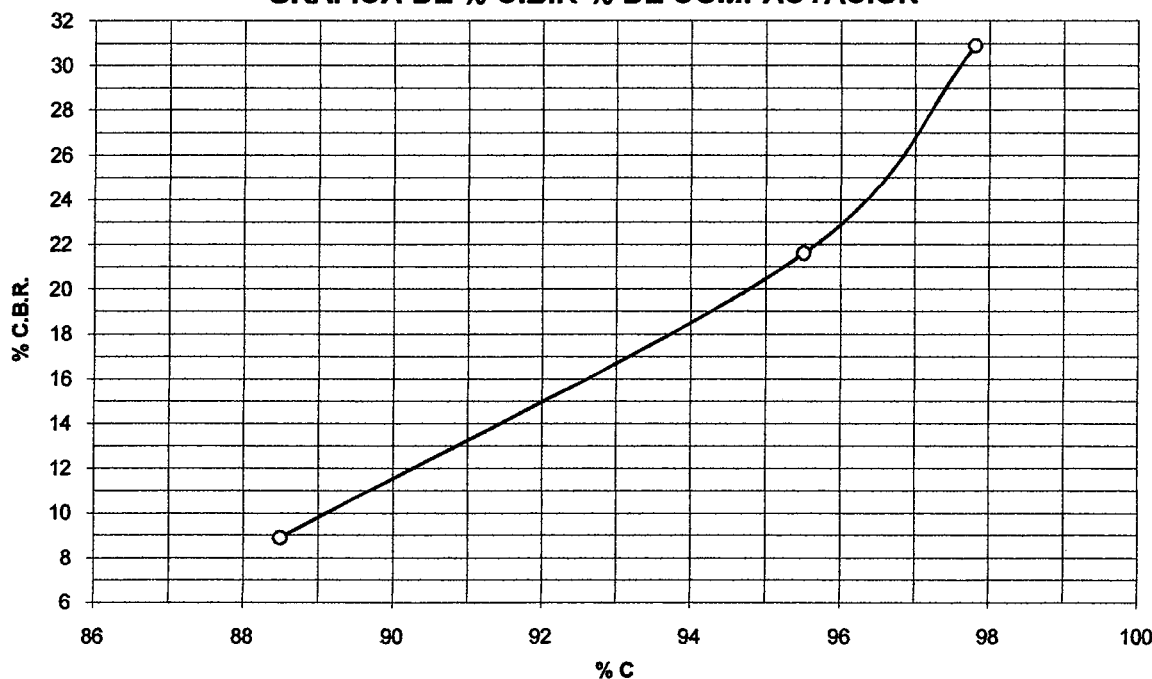
Nº 21054

INFORME No.: 220 S.S. O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193
 Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante
 Ubicación: Km. 26 carretera a El Salvador
 Descripción del suelo: Limo arcilloso color café con gravilla
 Fecha: 16 de julio de 2010

| PROBETA No. | GOLPES No. | A LA COMPACTACION | | C (%) | EXPANSION (%) | C.B.R. (%) |
|-------------|------------|-------------------|-----------------------------------|-------|---------------|------------|
| | | H (%) | γ_d (Lb/pie ³) | | | |
| 7 | 10 | 23.6 | 83.7 | 88.5 | 1.78 | 8.9 |
| 14 | 30 | 23.6 | 90.4 | 95.5 | 1.85 | 21.6 |
| 16 | 65 | 23.6 | 92.5 | 97.8 | 1.37 | 30.9 |

GRAFICA DE % C.B.R.-% DE COMPACTACION



Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21056

INFORME No. 222 S.S.

O.T. No. 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.

Norma: A.A.S.H.T.O. T-27, T-11

Proyecto: Guía para el diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Procedencia: Km. 26 carretera a El Salvador

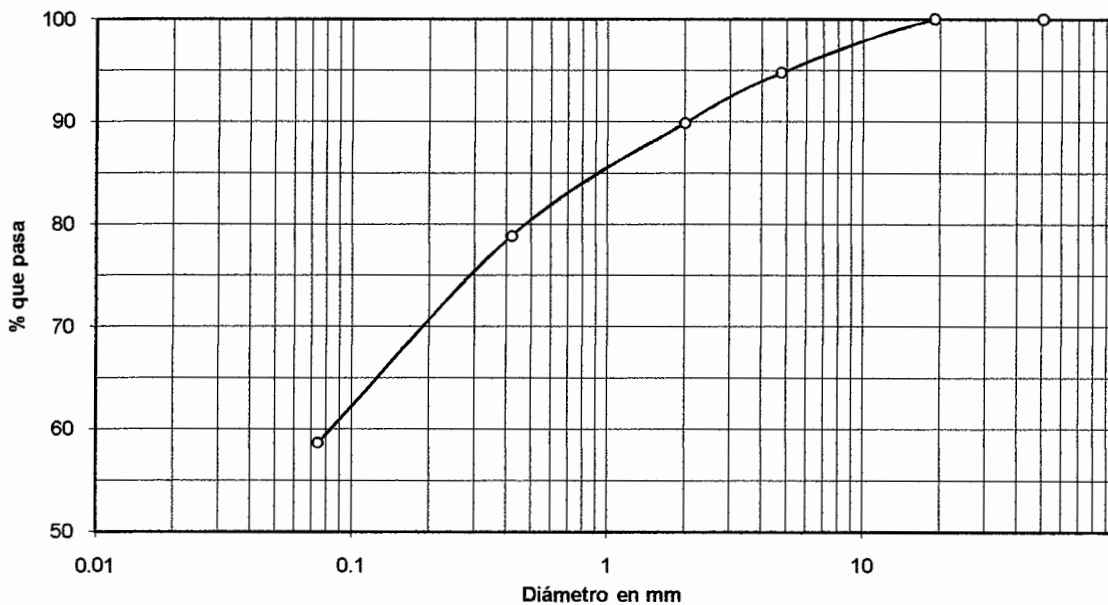
Fecha: 16 de julio de 2010

| Análisis con Tamices: | | |
|-----------------------|---------------|------------|
| Tamiz | Abertura (mm) | % que pasa |
| 2" | 50.8 | 100.00 |
| 3/4" | 19.00 | 100.00 |
| 4 | 4.76 | 94.80 |
| 10 | 2.00 | 89.90 |
| 40 | 0.42 | 78.90 |
| 200 | 0.074 | 58.70 |

% de Grava: 5.20

% de Arena: 36.10

% de Finos: 58.70



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café con gravilla

Clasificación: S.C.U.: MH P.R.A.: A - 7 - 5

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21055

INFORME No. 221 S. S.

O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú DeLeón López

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Km. 26 carretera a El Salvador

FECHA: 16 de julio de 2010

RESULTADOS:

| ENSAYO No. | MUESTRA No. | LL. (%) | I.P. (%) | C.S.U. * | DESCRIPCION DEL SUELO |
|------------|-------------|---------|----------|----------|--|
| 1 | 2 | 51.1 | 11.3 | MH | Limo arcilloso color café con gravilla |

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21066

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, MODULO DE RESILIENCIA

INFORME No.: 232 S.S.

O.T.: 27,090

INTERESADO: Heber Esaú De León López

PROYECTO: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.

UBICACIÓN: Km. 26 carretera a El Salvador

Fecha: 16 de julio de 2010.

Proporción: x Profundidad: 0.50 m

Muestra: 2

MODULO DE RESILIENCIA: 14,267 psi **DEFORMACION UNITARIA REMANENTE: 0.0074**

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo arcilloso color café con gravilla.

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

| | |
|---|--------|
| PROBETA No. | 1 |
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 10 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(psi) | 105.59 |
| PRESION INTERSTICIAL u(T/m ²) | x |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 1.31 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.73 |
| HUMEDAD (%H) | 32.1 |

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Marcela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21057

INFORME No.: 223 S.S.

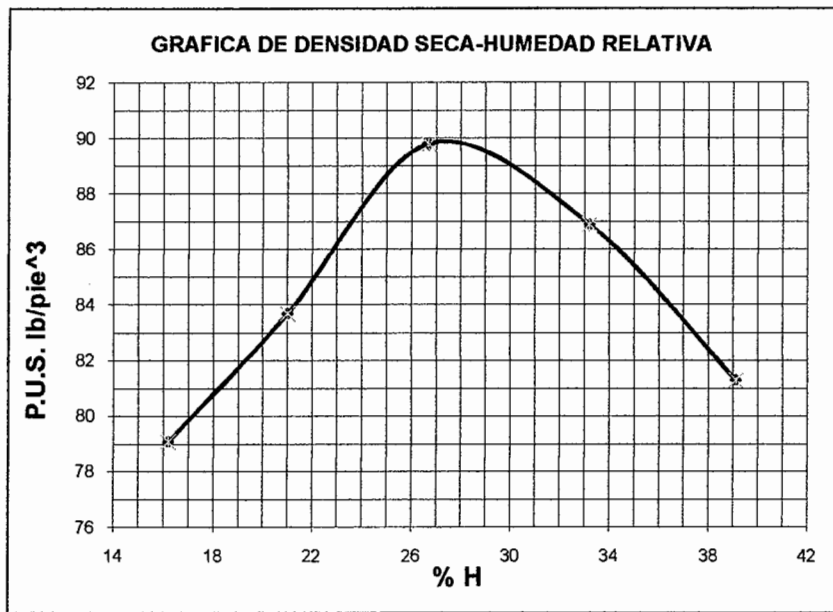
O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Proctor Estándar: () Norma:
Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Ubicación: Km. 24,5 carretera a El Salvador
Fecha: 16 de julio de 2010



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café claro
 Densidad seca máxima γ_d : 1442 Kg/m³ 90.0 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 27.5 %
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar Enrique Medrano Mendez
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



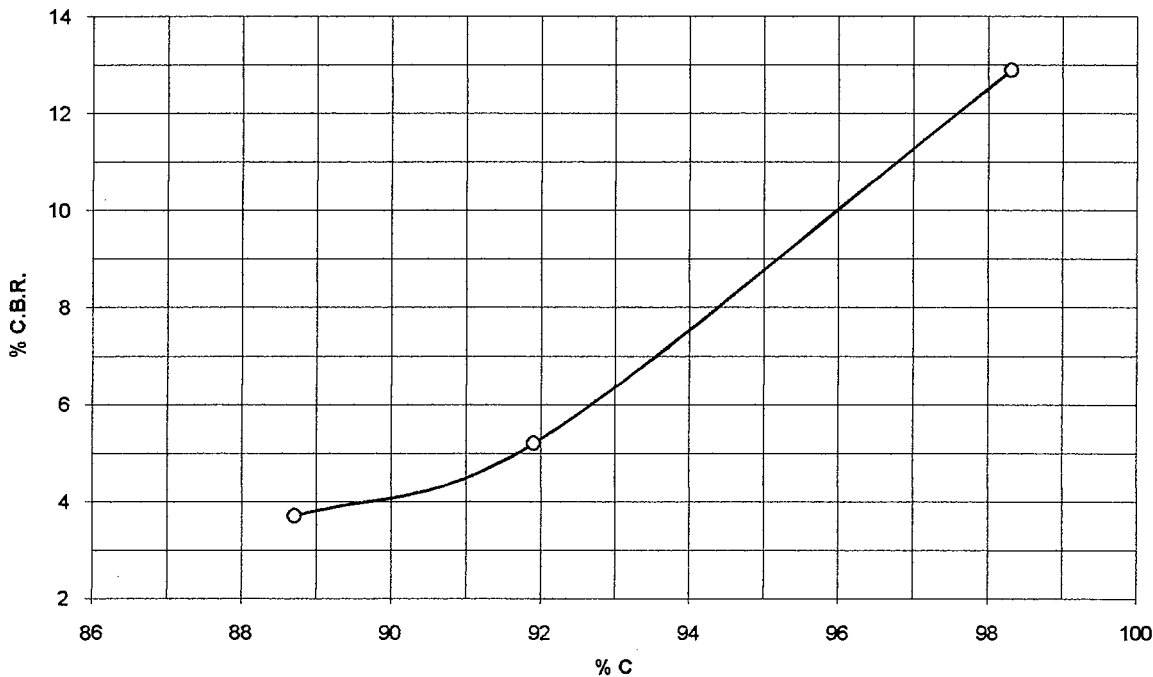
Nº 21058

INFORME No.: 224 S.S. O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193
 Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante
 Ubicación: Km. 24,5 carretera a El Salvador
 Descripción del suelo: Limo arcilloso color café claro
 Fecha: 16 de julio de 2010

| PROBETA No. | GOLPES No. | A LA COMPACTACION | | C (%) | EXPANSION (%) | C.B.R. (%) |
|----------------|---------------|-------------------|-----------------------------------|----------|------------------|---------------|
| | | H (%) | γ_d (Lb/pie ³) | | | |
| 1 | 10 | 29.5 | 81.3 | 88.7 | 2.17 | 3.7 |
| 2 | 30 | 29.5 | 84.2 | 91.9 | 1.85 | 5.2 |
| 3 | 65 | 29.5 | 90.3 | 98.3 | 1.74 | 12.9 |

GRAFICA DE % C.B.R.-% DE COMPACTACION



Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21060

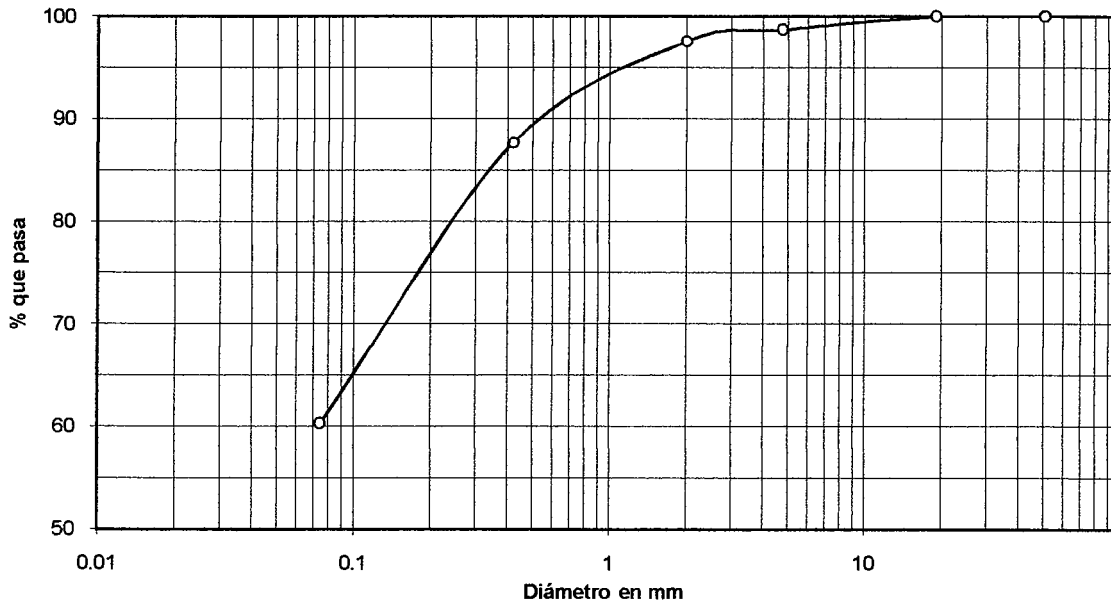
INFORME No. 226 S.S.

O.T. No. 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.
 Norma: A.A.S.H.T.O. T-27, T-11
 Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante
 Procedencia: Km. 24,5 carretera a El Salvador
 Fecha: 16 de julio de 2010

| Análisis con Tamices: | | |
|-----------------------|---------------|------------|
| Tamiz | Abertura (mm) | % que pasa |
| 2" | 50.8 | 100.00 |
| 3/4" | 19.00 | 100.00 |
| 4 | 4.76 | 98.70 |
| 10 | 2.00 | 97.60 |
| 40 | 0.42 | 87.70 |
| 200 | 0.074 | 60.30 |

% de Grava: 1.30
 % de Arena: 38.40
 % de Finos: 60.30



Descripción del suelo: Limo arcilloso color café claro
 Clasificación: S.C.U.: ML P.R.A.: A - 5
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC



Omar Enrique Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21059

INFORME No. 225 S. S.

O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Km. 24,5 carretera a El Salvador

FECHA: 16 de julio de 2010

RESULTADOS:

| ENSAYO No. | MUESTRA No. | L.L. (%) | I.P. (%) | C.S.U. * | DESCRIPCION DEL SUELO |
|------------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------------|
| 1 | 3 | 42.3 | 9.5 | ML | Limo arcilloso color café claro |

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21067

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, MODULO DE RESILIENCIA

INFORME No.: 233 S.S. O.T.: 27,090

INTERESADO: Heber Esaú De León López
 PROYECTO: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.
 UBICACIÓN: Km. 24.5 carretera a El Salvador Fecha: 16 de julio de 2010.
 Proporción: x Profundidad: 0.50 m Muestra: 3

| | |
|---|---|
| MODULO DE RESILIENCIA: 8,067 psi | DEFORMACION UNITARIA REMANENTE: 0.0060 |
|---|---|

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Limo arcilloso color café claro.
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

| | |
|---|-------|
| PROBETA No. | 1 |
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 10 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(psi) | 48.40 |
| PRESION INTERSTICIAL u(T/m ²) | x |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 1.32 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.77 |
| HUMEDAD (%H) | 34.3 |

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar Enrique Méndez Méndez
Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21061

INFORME No.: 227 S.S.

O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López

Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN

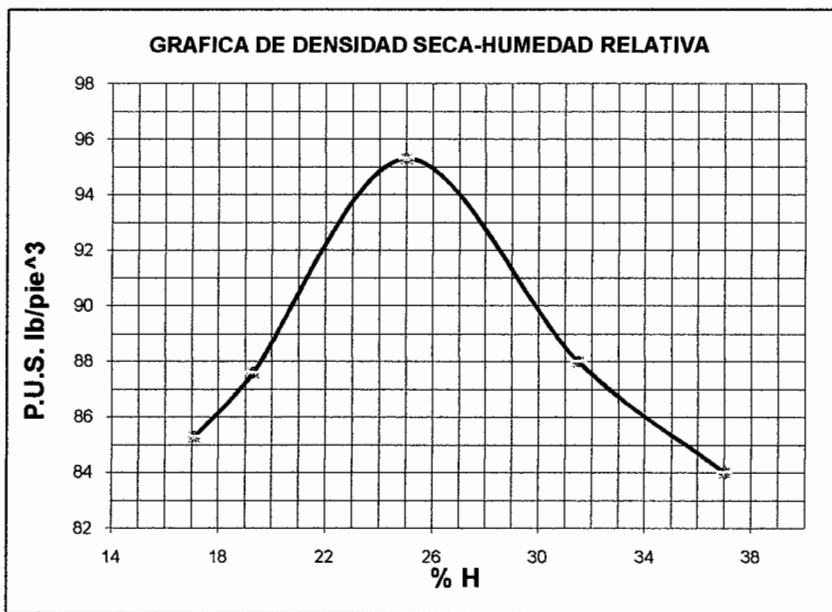
Proctor Estándar: () Norma:

Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Ubicación: Km. 31,5 carretera El Salvador

Fecha: 16 de julio de 2010



Descripción del suelo: Arcilla color café oscuro

Densidad seca máxima γ_d : 1527 Kg/m³

95.3 lb/ft³

Humedad óptima Hop.: 25.0 %

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar Enrique Medrano Mendez
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—

Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12

Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121

Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



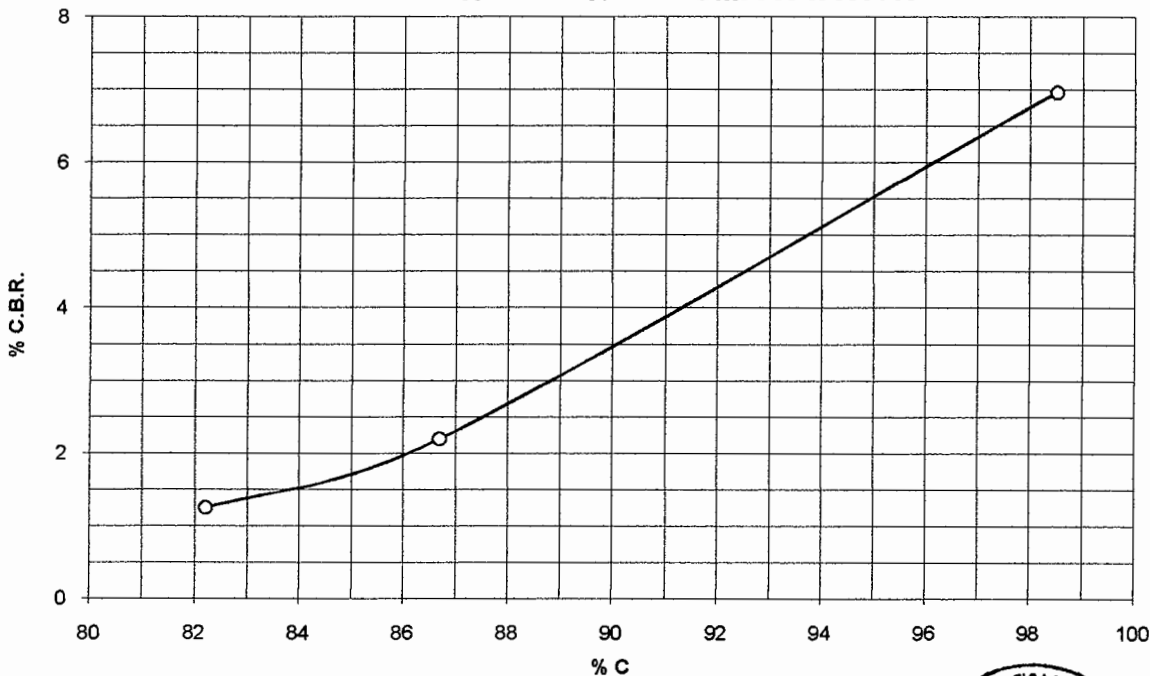
Nº 21062

INFORME No.: 228 S.S. O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
 Asunto: Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.) Norma: A.A.S.H.T.O. T-193
 Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante
 Ubicación: Km. 31,5 carretera El Salvador
 Descripción del suelo: Arcilla color café oscuro
 Fecha: 16 de julio de 2010

| PROBETA No. | GOLPES No. | A LA COMPACTACION | | C (%) | EXPANSION (%) | C.B.R. (%) |
|----------------|---------------|-------------------|-----------------------------------|----------|------------------|---------------|
| | | H (%) | γ_d (Lb/pie ³) | | | |
| 4 | 10 | 25.3 | 78.4 | 82.2 | 3.00 | 1.3 |
| 5 | 30 | 25.3 | 82.6 | 86.7 | 3.30 | 2.2 |
| 10 | 65 | 25.3 | 93.9 | 98.5 | 4.63 | 7.0 |

GRAFICA DE % C.B.R.-% DE COMPACTACION



Atentamente,



Vo. Bo.:

[Signature]



Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

[Signature]
Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21064

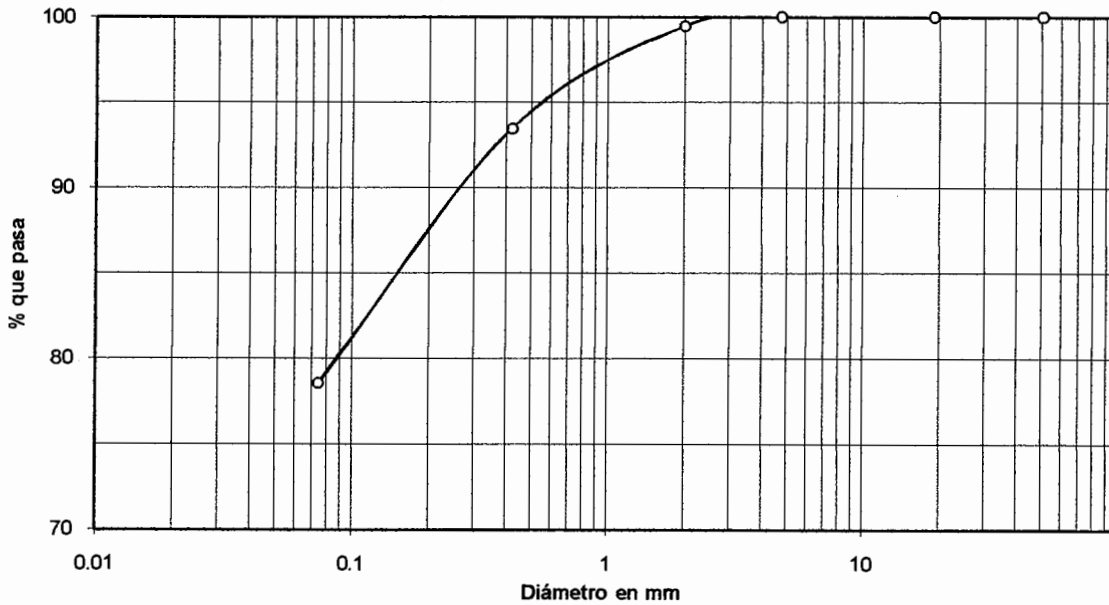
INFORME No. 230 S.S.

O.T. No. 27,090

Interesado: Heber Esaú De León López
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.
 Norma: A.A.S.H.T.O. T-27, T-11
 Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante
 Procedencia: Km. 31,5 carretera El Salvador
 Fecha: 16 de julio de 2010

| Análisis con Tamices: | | |
|-----------------------|---------------|------------|
| Tamiz | Abertura (mm) | % que pasa |
| 2" | 50.8 | 100.00 |
| 3/4" | 19.00 | 100.00 |
| 4 | 4.76 | 100.00 |
| 10 | 2.00 | 99.50 |
| 40 | 0.42 | 93.50 |
| 200 | 0.074 | 78.60 |

% de Grava: 0.00
 % de Arena: 21.40
 % de Finos: 78.60



Descripción del suelo: Arcilla color café oscuro
 Clasificación: S.C.U.: ML P.R.A.: A - 7 - 5
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo. 
 Inga. Telma Marcela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC




 Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos





CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21063

INFORME No. 229 S. S.

O.T.: 27,090

Interesado: Heber Esaú DeLeón López

Proyecto: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al módulo de resiliencia y al módulo de reacción de la subrasante

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Km. 31,5 carretera El Salvador

FECHA: 16 de julio de 2010

RESULTADOS:

| ENSAYO No. | MUESTRA No. | L.L. (%) | I.P. (%) | C.S.U. * | DESCRIPCION DEL SUELO |
|------------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------|
| 1 | 4 | 43 | 11.3 | ML | Arcilla color café oscuro |

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 21068

ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL, MODULO DE RESILIENCIA

INFORME No.: 234 S.S. O.T.: 27,090

INTERESADO: Heber Esaú De León López
 PROYECTO: Guía para diseño de estructura de pavimento flexible y rígido de acuerdo al modulo de resiliencia y al modulo de reaccion de la subrasante.
 UBICACIÓN: Km. 31.5 carretera a El Salvador Fecha: 16 de julio de 2010.
 Proporción: x Profundidad: 0.50 m Muestra: 4

| | |
|---|---|
| MODULO DE RESILIENCIA: 5,910 psi | DEFORMACION UNITARIA REMANENTE: 0.0048 |
|---|---|

TIPO DE ENSAYO: No consolidado y no drenado.
 DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla color café oscuro.
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

| | |
|---|-------|
| PROBETA No. | 1 |
| PRESION LATERAL (T/m ²) | 10 |
| DESVIADOR EN ROTURA q(psi) | 28.37 |
| PRESION INTERSTICIAL u(T/m ²) | x |
| DENSIDAD SECA (T/m ³) | 1.34 |
| DENSIDAD HUMEDA (T/m ³) | 1.73 |
| HUMEDAD (%H) | 29.1 |

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos

