



DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA CAPA BASE DE  
MACADAM HIDRÁULICO, MEDIANTE EL RETROCÁLCULO EN EL TRAMO  
COLONIA REGINA MARECOS – CIUDAD JUAN DE MENA.

**JUAN PABLO MEDINA MEZA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS**  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL  
Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2020

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA CAPA BASE DE  
MACADAM HIDRÁULICO, MEDIANTE EL RETROCÁLCULO EN EL TRAMO  
COLONIA REGINA MARECOS – CIUDAD JUAN DE MENA.**

**Elaborado por**

**JUAN PABLO MEDINA MEZA**

Tutor

**MSc. Ing. Hugo José Florentín.**

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y  
Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú,  
como requisito para la obtención del título de Ingeniero  
Civil

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2020

## PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Civil aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

-----  
Prof. Ing.

-----  
Prof. Ing.

-----  
Prof. Ing.

***Dedicado a:***

A Dios, por guiar mis pasos y haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido de ayuda clave para llevar a cabo este trabajo.

A mis padres, Joaquín y Sonia, por ser pilares fundamentales y soporte incondicional en todo este proceso, así también a Lucía Agüero por todo el apoyo.

A mis hermanos, Joaquín y Lucas, gracias por estar conmigo y apoyarme siempre.

***Agradecimientos:***

A mi tutor el Ingeniero Hugo Florentín por la orientación y ayuda brindada para la realización del trabajo final de grado.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Juan Manuel Gómez, por toda la ayuda y apoyo en todo el proceso de elaboración del trabajo.

A la Empresa METRICA por proporcionarme el Deflectometro de Impacto pesado para la medición de deflexiones del tramo.

A los Ingenieros, Guillermo Mas, Eliodoro, Fernando Paniagua, Alberto Alcaraz, también agradecer a los laboratoristas Alfredo Trinidad y Gustavo Samudio.

# DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA CAPA BASE DE MACADAM HIDRÁULICO, MEDIANTE EL RETROCÁLCULO EN EL TRAMO COLONIA REGINA MARECOS – CIUDAD JUAN DE MENA.

JUAN PABLO MEDINA MEZA

## RESUMEN

El pavimento es una estructura constituida por varias capas, de diversos materiales, espesores y módulos, que al ser sometida a una determinada sollicitación se produce en él, un estado de tensiones y deformaciones verticales en magnitudes muy pequeñas (del orden de centésimas o milésimas de milímetros). Este desplazamiento se conoce con el nombre de deflexión. La deflexión es una característica del pavimento que depende de los materiales que lo conforman y del estado de estos, a partir de lo cual, es posible realizar una relación entre los valores de los módulos de las diversas capas que componen el pavimento y los valores de la deflexión de los mismos. El objeto del presente trabajo consiste en realizar una evaluación estructural de la capa base de Macadam Hidráulico, de una obra terminada, en este caso el tramo correspondiente entre la Colonia Regina Marecos y la Ciudad Juan de Mena, de aproximadamente 12 Km de extensión, mediante la medición de deflexiones a lo largo del tramo de forma ascendente y descendente en un total de dos ensayos por puntos, a través de pruebas no destructivas consistente en la medición de deflectometría, con equipo de deflectómetro de impacto tipo FWD. La estructura en estudio está formada por una capa de rodadura de pavimento asfáltico, una base de macadam hidráulico, y una subrasante mejorada. Se propone determinar la capacidad estructural del macadam y así también la capacidad estructural de todo el paquete. (método AASHTO), luego se procesan los datos obtenidos de la deflectometría FWD por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo (método mecanicista) que permite determinar el módulo elástico de cada capa del pavimento. Por último, también se determina la capacidad de la estructura del pavimento indicada en cantidades de ejes equivalentes que aun pueda recibir la estructura.

**Palabras claves:** Deflexión, retrocálculo, modulo elástico, numero estructural, FDW

# DETERMINATION OF THE RESILIENT MODULE FOR BASE LAYER OF MACADAM HYDRAULIC, THROUGH THE BACKCALCULATION IN THE COLUMNIA REGINA MARECOS – CIUDAD JUAN DE MENA

JUAN PABLO MEDINA MEZA

## ABSTRACT

The pavement is a structure consisting of several layers, of various materials, thicknesses and modules, which when subjected to a particular request produces a state of tension and vertical deformations in very small quantities (of the order of hundredths or thousandths of millimeters) This offset is known as deflection. Deflection is a characteristic of the pavement that depends on the materials that make it up and the state of these, from which, it is possible to make a relationship between the values of the modules of the different layers that make up the pavement and the values of the deflection of them. The purpose of this work is to carry out a structural evaluation of the Macadam Hydraulic base layer of a finished work, in this case the corresponding section between the Regina Marecos Colony and the City of Juan de Mena, approximately 12 km long, by the measurement of deflections along the section in ascending and descending form in a total of two tests per points, through non-destructive tests consisting of the measurement of deflectometry, with equipment of deflectometer of impact type FWD. The structure under study is formed by a rolling layer of asphalt pavement, a base of hydraulic macadam, and an improved subgrade. It is proposed to determine the structural capacity of the macadam and thus also the structural capacity of the entire package. (AASHTO method), then the data obtained from the FWD deflectometry is processed by means of an analytical technique known as backcalculation (mechanistic method) that allows to determine the elastic modulus of each pavement layer. Finally, the capacity of the pavement structure indicated in amounts of equivalent axes that the structure can still receive is also determined.

**Key Words:** Deflection, backcalculation, elastic modulus, structural number, FDW

## CONTENIDO

<b>PÁGINA DE APROBACIÓN</b> .....	i
<i>Dedicado a:</i> .....	ii
<i>Agradecimientos:</i> .....	iii
<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>CONTENIDO</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xiv
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>GENERALIDADES</b> .....	1
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.2. OBJETIVOS</b> .....	2
<b>1.2.1. Objetivo General</b> .....	2
<b>1.2.2. Objetivos Específicos</b> .....	2
<b>1.3. ALCANCE</b> .....	2
<b>1.4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
<b>1.5. BENEFICIARIOS</b> .....	4
<b>1.6. DESCRIPCION DEL PROYECTO - PAVIMENTACION ASFALTICA DEL TRAMO: CARAYAO – CLETO ROMERO Y COL. REGINA MARECOS – JUAN DE MENA – RUTA 3.</b> .....	4
<b>1.6.1 Localización del Proyecto</b> .....	4
<b>1.6.2 Características del Proyecto</b> .....	6
<b>1.6.2.1 Secciones típicas de Proyecto</b> .....	7
<b>1.6.2.2 Proceso constructivo aplicado</b> .....	12
<b>1.7. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO</b> .....	20
<b>CAPITULO 2</b> .....	21
<b>MARCO TEORICO</b> .....	21
<b>2.1. DEFINICION DE TERMINOS BASICOS</b> .....	21
<b>2.2. MATERIALES PETREOS</b> .....	24
<b>2.2.1 CLASIFICACIÓN DE ROCAS POR SU FORMACIÓN GEOLÓGICA.</b> ...	25

2.2.1.1 Rocas Eruptivas o Ígneas.....	25
2.2.1.2 Rocas Sedimentarias.....	26
2.2.1.3 Rocas metamórficas.....	27
2.2.1.2.1. Basalto.....	28
2.2.1.2.2. Características.....	29
2.2.1.2.3. Composición química.....	29
2.2.1.2.4. Textura.....	29
2.2.1.2.5. Minerales principales y accesorios. ....	30
2.2.1.2.6. Uso frecuente del Basalto. ....	30
2.3. INTRODUCCION A LA VIALIDAD .....	30
2.3.1. TIPOS DE VIAS.....	30
2.3.1.1. Carreteras.....	30
2.3.1.2. Caminos.....	31
2.3.2. FUNCIONES DE LOS TIPOS DE VIAS.....	31
2.3.2.1. Carreteras.....	31
2.3.2.2. Caminos.....	31
2.3.3. PAVIMENTOS.....	32
2.3.3.1. Características que debe de tener un pavimento.....	32
2.3.3.2. Clasificación de los pavimentos .....	32
2.3.3.3. Pavimentos flexibles .....	33
2.3.3.4. Funciones de las capas de un pavimento flexible.....	34
2.3.3.5. Clasificación de materiales para base y subbase.....	35
2.3.3.6. Caracterización de Bases y Subbases Granulares.....	35
2.3.4. TIPOS DE ENSAYOS. ....	36
2.3.4.1. GRANULOMETRIA DE SUELOS .....	36
2.3.4.2. LIMITES DE ATTERBERG .....	38
2.3.4.3. ENSAYO DE COMPACTACION .....	40
2.3.4.4. ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE CON LA MAQUINA DE LOS ANGELES .....	43
2.3.4.5. FACTOR DE CUBICIDAD:.....	47
2.3.4.6. DETERMINACION DE ATAQUE POR SULATO EN AGREGADO: .....	50
2.4. MACADAM.....	58

2.4.2. RESEÑA HISTÓRICA DEL MACADAM.....	58
2.4.3. TIPOS DE MACADAM.....	62
2.4.3.1. Ligante bituminoso:.....	62
2.4.3.2. Macadam hidráulico.....	62
2.5. MODULO RESILIENTE .....	65
2.5.1. DEFLECTOMETRO DE IMPACTO.....	66
2.5.1.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO .....	66
2.5.1.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO	70
2.5.2. EVALUACION DE DEFLEXIONES. METODO AASHTO.....	71
2.5.2.1. NORMALIZACION DE LAS DEFLEXIONES.....	71
2.5.2.2. SECCIONES HOMOGENEAS.....	71
2.5.2.3. RETROCALCULO .....	71
2.5.3. EVALUACION ESTRUCTURAL. METODO MECANICISTA.....	75
2.5.3.1. RETROCALCULO DE MODULOS POR CAPAS .....	75
2.6. VERIFICACION DEL DISEÑO ESTRUCTURAL POR METODO AASHTO 93.	80
CAPÍTULO 3.....	88
3.1. METODOLOGIA.....	88
3.1.1 PLAN DE ACTIVIDADES.....	88
3.1.2 DESCRIPCION DEL ENFOQUE METODOLOGICO .....	89
CAPÍTULO 4.....	92
CARACTERIZACION DE MATERIALES.....	92
4.1. RESISTENCIA AL DESGASTE CON LA MAQUINA DE LOS ANGELES: ..	92
4.2. ENSAYO DEL FACTOR DE CUBICIDAD:.....	94
4.3. ENSAYOS DE DETERMINACION DE ATAQUE POR SULFATOS EN AGREGADOS:.....	95
4.4. GRANULOMETRIA DE LA PRIMERA CAPA: .....	96
4.5. GRANULOMETRIA ARENA DE RELLENO – PRIMERA CAPA: .....	97
4.6. ANALISIS GRANULOMETRICO – SEGUNDA CAPA.....	98
4.7. GRANULOMETRIA MATERIAL DE RELLENO-SEGUNDA CAPA:.....	99
4.7.1. ANALISIS GRANULOMETRICO - ARENA DE YACIMIENTO.....	100

<b>4.7.2. ANALISIS GRANULOMETRICO - ARENA DE YACIMIENTO CON TRITURADA 6ta.</b> .....	101
<b>4.1.1. LIMITES DE ATTERBERG - ARENA DE YACIMIENTO</b> .....	102
<b>CAPITULO 5</b> .....	103
<b>ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE DEFLECTOMETRIA</b> .....	103
<b>CAPITULO 6</b> .....	120
<b>VERIFICACION DEL PAQUETE ESTRUCTURAL</b> .....	120
<b>CAPITULO 7</b> .....	129
<b>COMPARACION DEL MACADAM HIDRAULICO RESPECTO A BASES GRANULARES</b> .....	129
<b>CAPITULO 8</b> .....	139
<b>ESPECIFICACIONES TECNICAS</b> .....	139
<b>CAPITULO 9</b> .....	147
<b>CONCLUSIONES</b> .....	147
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	147
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	149

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1: Localización del proyecto Pavimentación Asfáltica del tramo Carayao-Cleto Romero-Colonia Regina Marecos-Juan de Mena-Ruta N°3 (Km 100); Fuente: Elaboración propia.....	5
Ilustración 2:Localización del proyecto Pavimentación Asfáltica del tramo Carayao-Cleto Romero-Colonia Regina Marecos-Juan de Mena-Ruta N°3 (Km 100); Fuente: Elaboración propia.....	5
Ilustración 3: Localización del Proyecto Colonia Regina Marecos - Juan de Mena...	6
Ilustración 4: Vista del paquete estructural consolidado.....	8
Ilustración 5: Vista del paquete de estructural consolidado.....	9
Ilustración 6: Disposición de Secciones Tipo Colonia Regina Marecos – Juan de Mena.....	12
Ilustración 7: Esparcido de material pétreo correspondiente a la primera capa(cero) .....	13
Ilustración 8:Esparcido de material pétreo correspondiente a la primera capa(cero) .....	13
Ilustración 9: Compactación de la primera capa con rodillo liso .....	14
Ilustración 10: Esparcido de material de relleno para la primera capa .....	15
Ilustración 11: Riego y compactación del material de relleno .....	15
Ilustración 12: Esparcido de material pétreo correspondiente a la segunda capa (cerito) .....	16
Ilustración 13: Esparcido de material de relleno para la segunda capa.....	17
Ilustración 14: Esparcido de material de relleno para la segunda capa.....	18
Ilustración 15: Compactación del material de relleno segunda capa.....	18
Ilustración 16: Riego del relleno de la segunda capa .....	19
Ilustración 17:Imprimacion de la capa superior de macadam.....	19
Ilustración 18: Tamices superpuestas [3] .....	23
Ilustración 19: Curva granulométrica [3] .....	24
Ilustración 20: Ejemplos de rocas ígneas .....	26
Ilustración 21: Ejemplos de rocas sedimentarias. [4].....	27
Ilustración 22: Ejemplo de rocas metamórficas. [4] .....	28

Ilustración 23: Sección Transversal de Pavimento Asfáltico.....	34
Ilustración 24: Material pétreo, cantera el Camino .....	37
Ilustración 25: Equipo de Casa Grande.....	40
Ilustración 26: Equipos de clasificación y Proctor Normal .....	42
Ilustración 27: Equipo de clasificación de suelo, Proctor Modificado.....	43
Ilustración 28: Maquina para elaboración de Macadam (1908) .....	60
Ilustración 29: Ejecución de macadam en Turnpike Road, Maryland - 1823 (Carl Rakeman) .....	60
Ilustración 30: Construcción de la capa base, Operarios, con gafas y martillos para acabar de reducir los tamaños .....	61
Ilustración 31: El transporte de macadam desde el machacador en cantera en 1910 .....	62
Ilustración 32: Deflectómetro de Impacto FWD .....	67
Ilustración 33: Vista del Equipo computacional con los resultados de la medición..	68
Ilustración 34: Concepto de mediciones con Deflectómetro de Impacto .....	70
Ilustración 35: Esquema grafico del proceso del retrocálculo mecanicista .....	80
Ilustración 36 : Relación confiabilidad - costo.....	82
Ilustración 37: Resultado del ensayo de Resistencia al desgaste con la Maquina de los Ángeles .....	93
Ilustración 38: Resultado del ensayo de Factor de Cubicidad .....	94
Ilustración 39: Resultado del ensayo de Determinación de ataque por Sulfato en Agregados .....	95
Ilustración 40: Equipo FWD (METRICA) para el análisis deflectométrico .....	103
Ilustración 41: Ejemplo de hoja de entrada de datos del Software BackVide 2018 .....	106
Ilustración 42: Valores de Módulos vs Coeficientes estructurales para carpeta asfáltica .....	123
Ilustración 43: Ventana del Cálculo de los EJES EQUIVALENTES admisibles para Base Granular .....	133
Ilustración 44: Costos unitario de producción del una Base Granular (90-10).....	135
Ilustración 45: Costo unitario de producción de una base de Macadam Hidráulico. ....	136

Ilustración 46: Costo unitario de la construcción de una Base Granular (90-10) ...	137
Ilustración 47: Costo unitario de la construcción de una base de Macadam Hidráulico.....	138

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación mineral de rocas ígneas [4] .....	26
Tabla 2: Propiedades Ingenieriles de las Rocas (Según Cordon y Beste). [9] .....	36
Tabla 3: Diámetros de las partículas de agregado según las diferentes normativas .....	38
Tabla 4: Granulometría según tipo de ensayo .....	44
Tabla 5: Numero y masa de esferas según tipo de ensayo.....	45
Tabla 6: Composición granulométrica de las muestras por ensayar .....	48
Tabla 7: Abertura de las placas reductoras .....	49
Tabla 8: Agregado fino .....	52
Tabla 9: Agregado grueso .....	52
Tabla 10; Determinación cuantitativa del agregado grueso.....	56
Tabla 11: Planilla de informe sugerida .....	57
Tabla 12: Rangos de granulometría y tolerancias [2] .....	64
Tabla 13: Índice de serviciabilidad en función de la calidad de la vía.....	81
Tabla 14: Niveles de confiabilidad por tipo de vía .....	83
Tabla 15: Valores de Desviación estándar .....	83
Tabla 16: Valores recomendados de DL fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93. ....	86
Tabla 17: Factor de equivalencia de carga de AASHTO .....	87
Tabla 18: Ensayo de Granulometría piedra CERO.....	96
Tabla 19: Curva granulométrica para la piedra Cero .....	96
Tabla 20: Resultado de ensayo Granulométrico, relleno para macadam .....	97
Tabla 21: Ensayo de Granulometría piedra CERITO .....	98
Tabla 22: Curva granulométrica para la piedra Cerito .....	99
Tabla 23: Resultado Granulométrico de arena de yacimiento .....	100

Tabla 24: Resultado Granulométrico arena de yacimiento con triturada 6ta .....	101
Tabla 25: Resultado de límites de Atterberg.....	102
Tabla 26: Resumen de resultados de módulos en MPa por capa .....	119
Tabla 27: Valores de Confiabilidad recomendada. Fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.....	121
Tabla 28: Valores de Desviación Estándar (So). Fuente de consulta de la especialidad.....	121
Tabla 29: Valores de pérdida de serviciabilidad Pt recomendados. Fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.....	122
<i>Tabla 30: Fajas granulométricas de las diferentes capas de macadam .....</i>	<i>140</i>

## LISTA DE ABREVIATURAS

FWD	Falling Weight Deflectometers / Deflectometro de Impacto
MOPC	Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones
C.B.R	California Bearing Ratio / Indice de Capacidad Soporte de California
AASHTO	American Association of Highway and Transportations Officials / Asociacion Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte
Mr	Modulo Resiliente
SN	Numero Estructural
ESALs	Equivalent simple axial load / Ejes Equivalentes 18Kips (80Kn)
W18	Unidades de ESAL de 18 kips acumuladas en un periodo de análisis.
$E_{BS}$	Modulo Elástico de la capa base
$E_{SB}$	Modulo Elástico de la capa subbase
$a_2, a_2$	Coficiente Estructural de la base, subbase



## **CAPÍTULO 1**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El pavimento es una estructura constituida por un sistema multicapas, de diversos materiales, espesores y módulos, que al ser sometidas a una determinada sollicitación se produce en él, un estado de tensiones y deformaciones verticales en magnitudes muy pequeñas, este desplazamiento se conoce con el nombre de deflexiones.

La deflexión es una característica del pavimento que depende de los materiales que lo conforman y del estado de estos, a partir de lo cual, es posible una relación entre los valores de los módulos de las diversas capas que componen el pavimento y los valores de la deflexión de los mismos.

Para medir o cuantificar la deflexión, existen una variada gama de técnicas, a saber; Viga Benkelman, Deflectografos Lacroix, Curvimetros, Deflectometro de Impacto o conocido por sus siglas inglesas como FWD (Falling Weight Deflectometers).

El objeto del presente trabajo consiste en caracterizar los materiales utilizados para la construcción de la capa base de Macadam Hidráulico y determinar el valor del módulo por medio de la utilización del Deflectometro de Impacto y a través de una técnica analítica conocida como retroanálisis de las deflexiones medidas.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar el módulo resiliente para capa base de macadam hidráulico mediante el análisis de deflectometría en el tramo seleccionado.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Extraer muestras, recabar informaciones correspondientes al área de investigación durante la etapa de construcción.
- Caracterizar los materiales constituyentes utilizados para la construcción de la capa de Macadam Hidráulico.
- Realizar pruebas de Deflectometría con equipo FWD (Falling Weight Deflectometer).
- Determinar el Módulo Resiliente por medio del retroanálisis de los resultados de Deflectometría obtenidos.
- Estimar el comportamiento estructural de la base de Macadam Hidráulico.

## **1.3. ALCANCE**

- Caracterizar los materiales utilizados en el tramo Colonia Regina Marecos y la Ciudad Juan de Mena.
- Determinar el Módulo Resiliente por medio del retrocálculo en el tramo seleccionado.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN

La tecnología y los métodos de diseño cambian acorde a los avances en las investigaciones y experimentos desarrollados, teniendo como resultado una serie de lineamientos y parámetros enfocados en la obtención de diseños más eficientes, que cumplan con un buen desempeño para el número de repeticiones de cargas a las que será sometida.

Los métodos de diseño vigentes introducen el módulo resiliente como parámetro para el dimensionamiento del paquete estructural, pero una limitante es que la determinación del módulo resiliente en laboratorio requiere del uso de equipos de ensayos escasos y costosos, lo que limita su aplicación generalizada, por tal razón, se recurre a otras alternativas para determinar este parámetro de diseño. Entre las alternativas, podemos mencionar el Deflectómetro de Impacto (FWD), que emula de manera muy aproximada a las condiciones reales de sollicitación en la que se encuentran los pavimentos en servicio, y nos permite obtener el valor del módulo resiliente de las capas constituyentes del paquete de firmes.

Otros de los motivos por la cual se justifica esta investigación es que no se cuenta con datos específicos y reales acerca del valor del módulo de este tipo de material en nuestra región, lo que crea alguna incertidumbre a la hora de realizar el cálculo del paquete estructural.

Con esta investigación se podrá obtener información sobre el módulo de dicho material, que podrá ser adoptada por los profesionales del área.

## **1.5. BENEFICIARIOS**

Los beneficiados serán todos aquellos profesionales que quieran utilizar el macadam hidráulico como parte del paquete estructural que se valdrán de los resultados de esta investigación en el momento de considerar su aporte en cuanto a sus características estructurales.

## **1.6. DESCRIPCION DEL PROYECTO - PAVIMENTACION ASFALTICA DEL TRAMO: CARAYAO – CLETO ROMERO Y COL. REGINA MARECOS – JUAN DE MENA – RUTA 3.**

### **1.6.1 Localización del Proyecto**

El proyecto “Pavimentación asfáltica del tramo: Carayao – Cleto Romero y Col. Regina Marecos – Juan de Mena – Ruta 3”, conecta la Ruta PY08 desde la ciudad de Carayao con la Ruta PY03, tiene una extensión lineal de 74 km cuyo punto de partida es la intersección de, la Ruta Carayao – Juan de Mena con la Ruta PY08 (PK 0+000), el proyecto lo lleva a cabo el consorcio YHAGUY, que está compuesta por las siguientes empresas, Compañía de Construcciones Civiles S.A (CCC S.A), Constructora MM, y la empresa CONSTRUPAR. Como fiscalización se encuentra el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC).

Ilustración 1: Localización del proyecto Pavimentación Asfáltica del tramo Carayao-Cleto Romero-Colonia Regina Marecos-Juan de Mena-Ruta N°3 (Km 100); Fuente: Elaboración propia

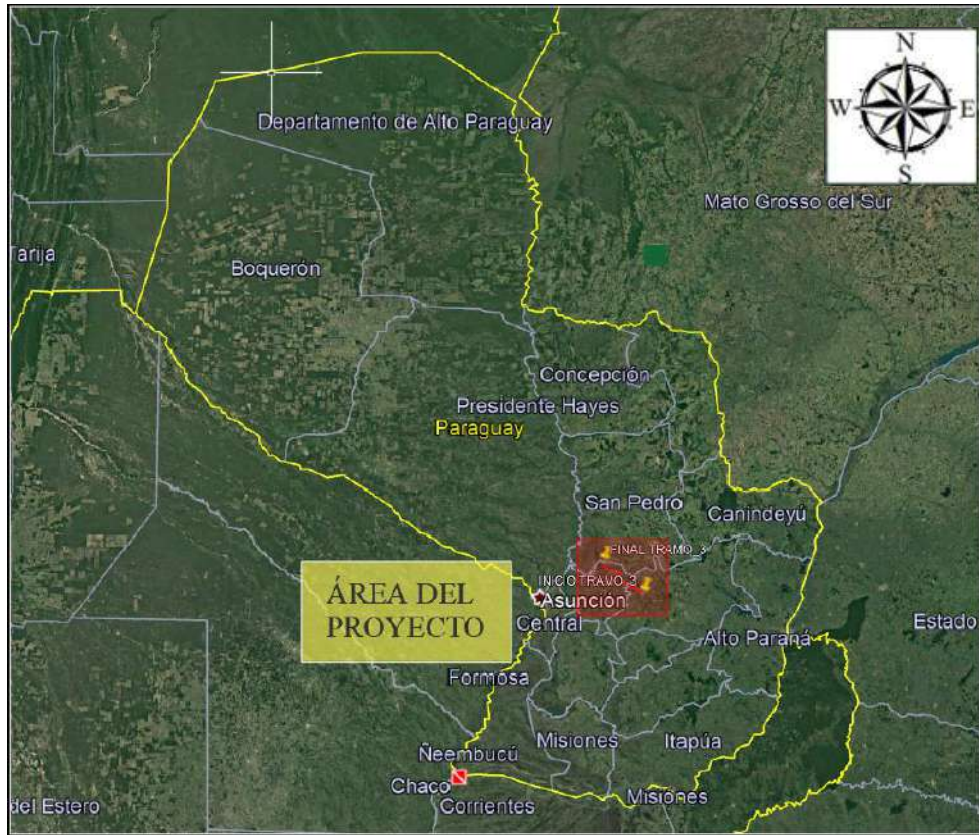


Ilustración 2: Localización del proyecto Pavimentación Asfáltica del tramo Carayao-Cleto Romero-Colonia Regina Marecos-Juan de Mena-Ruta N°3 (Km 100); Fuente: Elaboración propia



La ciudad de Juan de Mena está ubicada a 56 km de la ciudad de Carayao y aproximadamente a 88 km de la rotonda de la ciudad de Coronel Oviedo, Juan de Mena es un municipio del departamento de Cordillera, con 965km<sup>2</sup> de territorio es el distrito más extenso de dicho departamento.

El tramo para el proyecto de investigación va desde, Colonia Regina Marecos y la ciudad de Juan de Mena, que corresponden a las progresivas 44+010 hasta la progresiva 56+180.

*Ilustración 3: Localización del Proyecto Colonia Regina Marecos - Juan de Mena*

*Fuente: Elaboración propia*



### **1.6.2 Características del Proyecto**

Como se mencionó anteriormente el proyecto tiene una extensión de 74 km (0+000 – 74+000), y se divide en cuatro tramos, que corresponde a las siguientes progresivas respectivamente:

Tramo 1: Desde la intersección de la Ruta Carayao – Juan de Mena con la Ruta PY08 (0+000) hasta Cleto Romero (22+000).

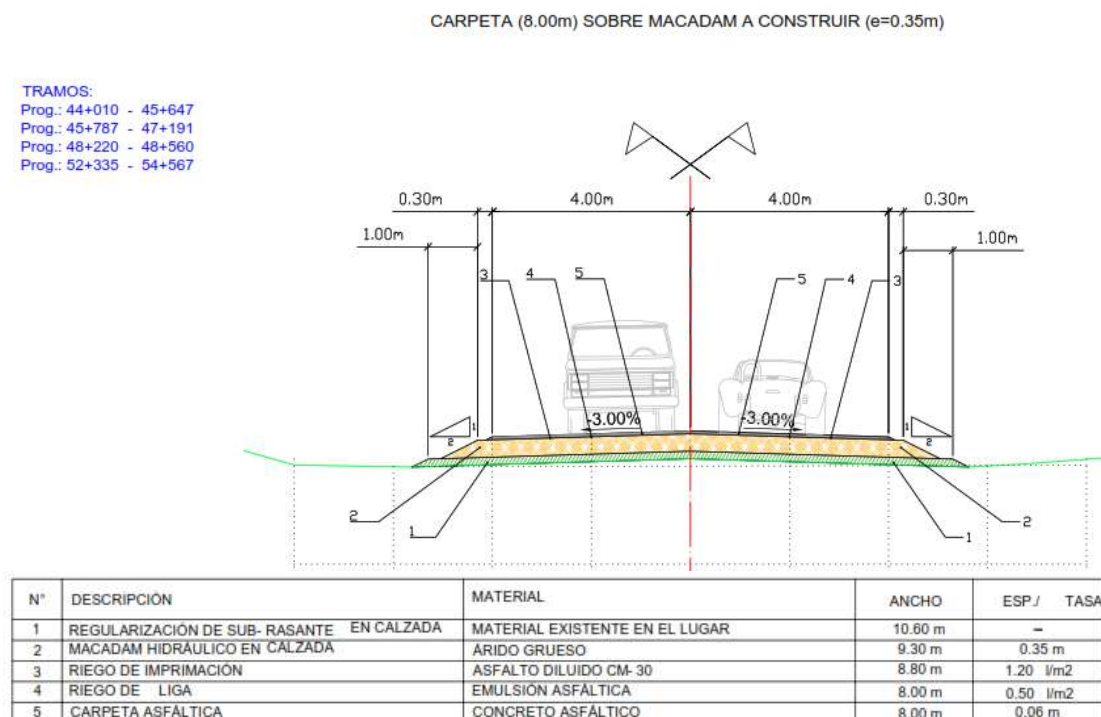
Tramo 2: Tiene como inicio el final del tramo 1, desde Cleto Romero (22+000) hasta la Colonia Regina Marecos (44+010).

**Tramo 3:** El final del tramo 2 da comienzo a nuestro tramo en estudio, desde Colonia Regina Marecos (44+010) hasta la Ciudad Juan de Mena (56+180).

Tramo 4: El último tramo se extiende desde la Ciudad de Juan de Mena (56+180) hasta la intersección con la Ruta PY03 (74+000).

### 1.6.2.1 Secciones típicas de Proyecto

A lo largo del desarrollo del proyecto, en los diferentes tramos se presentan distintas configuraciones de paquetes de firmes, en el tramo de interés para este trabajo de investigación fueron utilizadas tres secciones tipo, a continuación, se ilustra y describen cada uno de ellos.



Esta sección tipo es la que se ha estudiado en este proyecto, está constituido por una base de Macadam hidráulico de 35cm con un ancho de plataforma de 4.30m, por encima de la base se encuentra una capa de pavimento asfaltico de 6cm con un ancho de plataforma de 4m, el paquete de firmes está apoyada sobre una subrasante de material existente en el lugar.

En las siguientes imágenes se observa la estructura y condición final, como se puede observar las capas que constituyen la capa base de Macadam han quedado totalmente mezcladas sin posibilidad de identificarlas por capa.

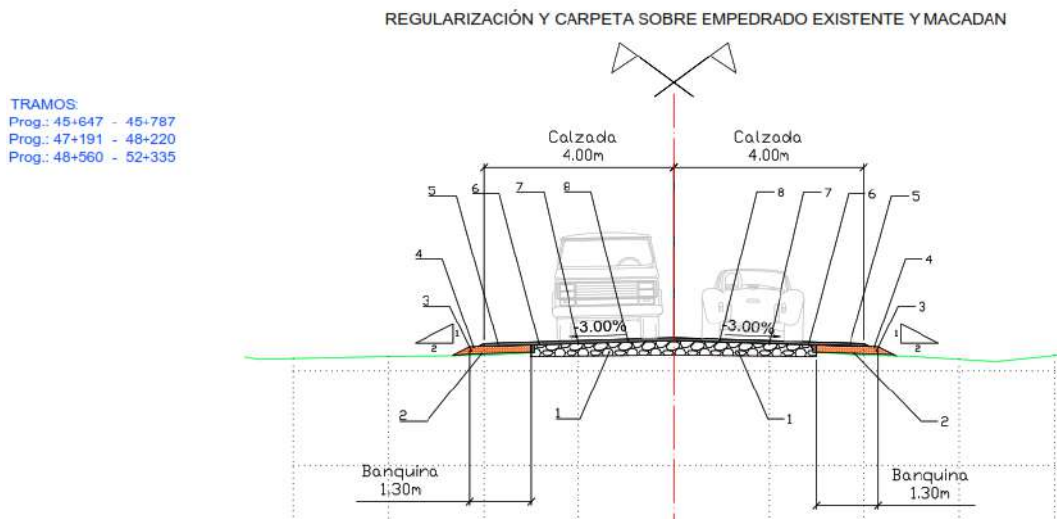
*Ilustración 4: Vista del paquete estructural consolidado.*

*Fuente: Elaboración propia.*



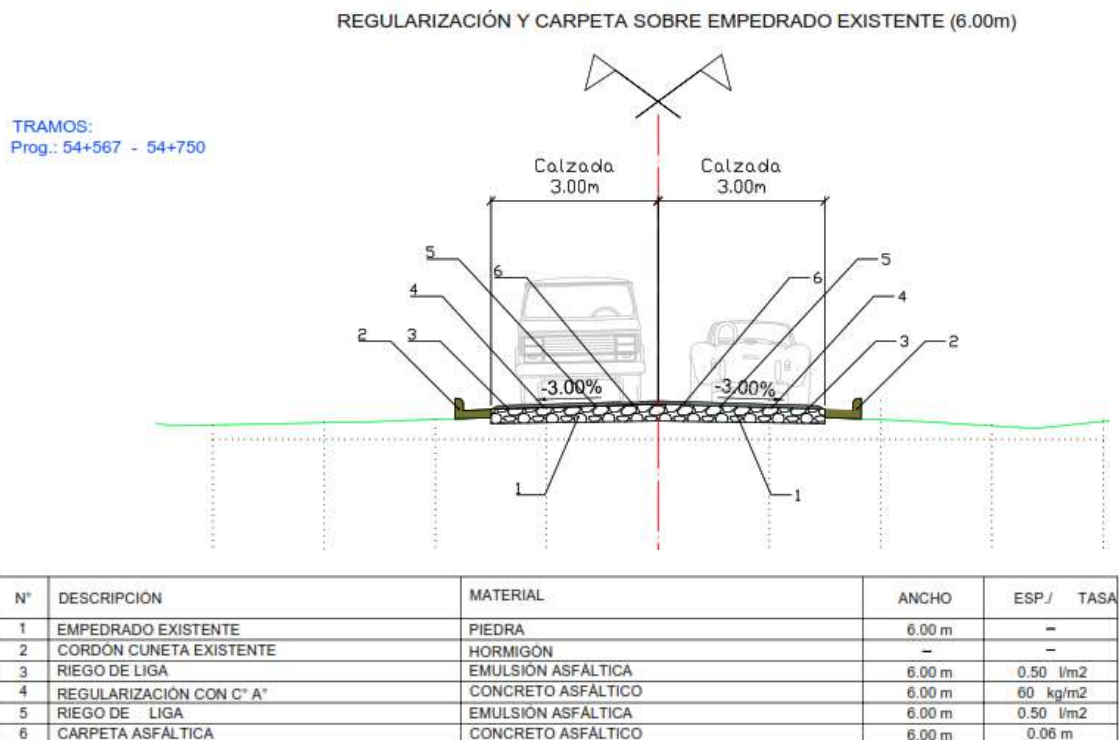
Ilustración 5: Vista del paquete de estructural consolidado

Fuente: Elaboración propia.

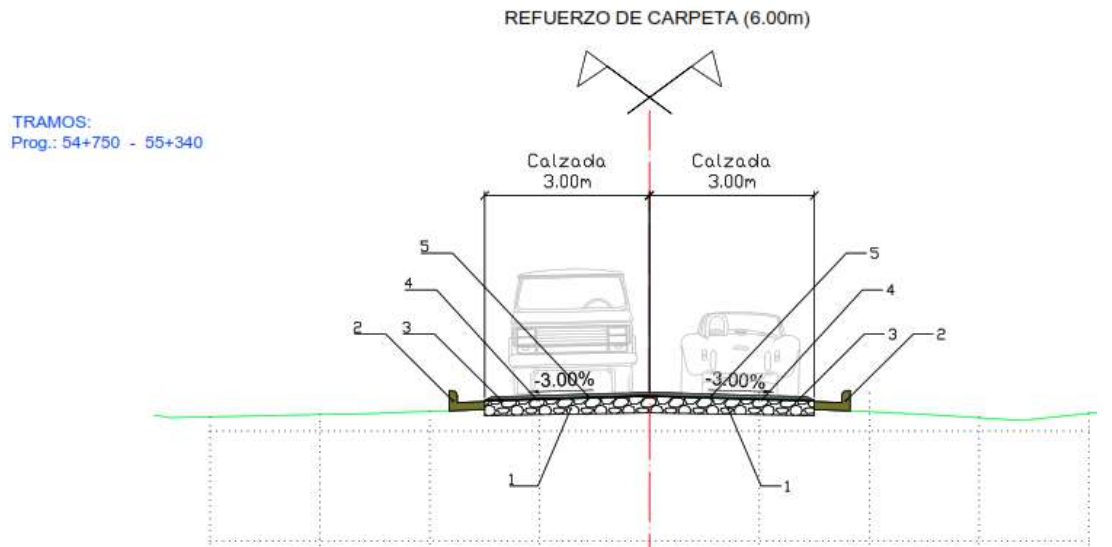


N°	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ANCHO	ESP./TASA
1	EMPEDRADO EXISTENTE	PIEDRA	6.00 m	-
2	REGULARIZACIÓN DE SUB- RASANTE EN BANQUINA	MATERIAL EXISTENTE EN EL LUGAR	2.00 x 1.60 m	-
3	MACADAM HIDRÁULICO EN BANQUINA	ÁRIDO GRUESO	2.00 x 1.45 m	0.15 m
4	RIEGO DE IMPRIMACIÓN	ASFALTO DILUIDO CM- 30	2.00 x 1.40 m	1.20 l/m <sup>2</sup>
5	RIEGO DE LIGA	EMULSIÓN ASFÁLTICA	6.00 m	0.50 l/m <sup>2</sup>
6	REGULARIZACIÓN CON C" A"	CONCRETO ASFÁLTICO	6.00 m	60 kg/m <sup>2</sup>
7	RIEGO DE LIGA	EMULSIÓN ASFÁLTICA	8.00 m	0.50 l/m <sup>2</sup>
8	CARPETA ASFÁLTICA	CONCRETO ASFÁLTICO	8.00 m	0.06 m

Como se mencionó anteriormente el tramo 3 cuenta con varias secciones tipo, en este caso la sección correspondiente a las progresivas arriba mencionadas en la ilustración está compuesta por una capa base de pavimento tipo empedrado existente con un ancho de plataforma de 3m, en banquina se tiene una subrasante de material existente (ancho=1.60 en ambos lados) que sirve de asiento a una capa base de macadam hidráulico (ancho=1.45, ambos lados), y como carpeta de rodadura pavimento asfaltico de 6cm de espesor.

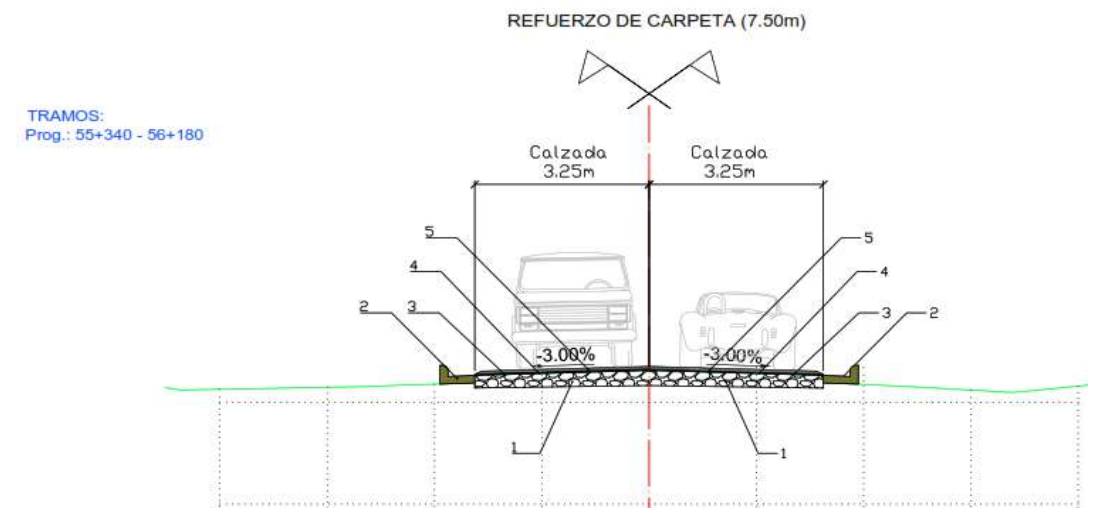


En las progresivas 54+567 – 54+750 la secciones tipo, está compuesta por una capa base de pavimento tipo empedrado existente con un ancho de plataforma de 3m sin banquina, con cordón cuneta existente en ambos lados, y como carpeta de rodadura pavimento asfaltico de 6cm de espesor.



N°	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ANCHO	ESP./ TASA
1	EMPEDRADO EXISTENTE	PIEDRA	6.00 m	-
2	CORDÓN CUNETETA EXISTENTE	HORMIGÓN	-	-
3	CARPETA EXISTENTE	CONCRETO ASFÁLTICO	6.00 m	-
4	RIEGO DE LIGA	EMULSIÓN ASFÁLTICA	6.00 m	0.50 l/m <sup>2</sup>
5	CARPETA ASFÁLTICA	CONCRETO ASFÁLTICO	6.00 m	0.06 m

En las progresivas 54+750 – 55+340 la secciones tipo, está compuesta por una capa base de pavimento tipo empedrado existente con un ancho de plataforma de 3m sin banquina por encima pavimentación asfáltica existente, como también cordón cuneta existente en ambos lados, y un refuerzo de carpeta de rodadura, pavimento asfaltico de 6cm de espesor.



N°	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	ANCHO	ESP./ TASA
1	EMPEDRADO EXISTENTE	PIEDRA	7.50 m	-
2	CORDÓN CUNETETA EXISTENTE	HORMIGÓN	-	-
3	CARPETA EXISTENTE	CONCRETO ASFÁLTICO	7.50 m	-
4	RIEGO DE LIGA	EMULSIÓN ASFÁLTICA	6.00 m	0.50 l/m <sup>2</sup>
5	CARPETA ASFÁLTICA	CONCRETO ASFÁLTICO	6.00 m	0.06 m

En las progresivas 55+340 – 56+180 la secciones tipo, está compuesta por una capa base de pavimento tipo empedrado existente con un ancho de plataforma de 3.25m sin banquina por encima pavimentación asfáltica existente, como también cordón cuneta existente en ambos lados, y un refuerzo de carpeta de rodadura, pavimento asfáltico de 6cm de espesor.

En la siguiente ilustración se puede observar las distintas secciones tipo en todo el tramo de Proyecto.

*Ilustración 6: Disposición de Secciones Tipo Colonia Regina Marecos – Juan de Mena*

*Fuente: Elaboración propia.*



Amarillo: Tramos donde la base es de macadam hidráulica.

Rojo: Tramos donde la base es de empedrado existente.

### 1.6.2.2 Proceso constructivo aplicado

#### *Primera Capa:*

La primera capa está constituida de piedra basáltica con diámetros de 4 pulg denominada (cero), extraídas directamente de la cantera para su colocación. El

material será puesto en pista con un espesor de 20cm (retenido  $\frac{3}{4}$ ) que posteriormente serán compactadas con 4 pasadas de compactador liso.

*Ilustración 7: Esparcido de material pétreo correspondiente a la primera capa(cero)*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 8: Esparcido de material pétreo correspondiente a la primera capa(cero)*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 9: Compactación de la primera capa con rodillo liso*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Relleno de la Primera Capa:*

Como material para el relleno de los espacios generados entre las piedras de 4 pulg de la primera capa se colocarán una mezcla de material de trituración 5ta y 6ta en la siguiente proporción, 75% 6ta y 25%5ta, una cantidad aproximada de 25 kg/m<sup>2</sup>, con 2 pasadas de compactador liso, y finalmente una pasada del camión regador.}

*Ilustración 10: Esparcido de material de relleno para la primera capa*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 11: Riego y compactación del material de relleno*

*Fuente: Elaboración propia.*



### *Segunda Capa:*

La segunda capa (cerito), corresponde a piedras basálticas de diámetros aproximados de (2 1/2) pulg (retenido 1/2), extraídas directamente de la cantera para su utilización en un espesor de 15cm colocada y esparcida en pista con topadora, para su posterior compactación con rodillo liso aproximadamente 4 pasadas.

*Ilustración 12: Esparcido de material pétreo correspondiente a la segunda capa (cerito)*

*Fuente: Elaboración propia.*



### *Relleno Segunda Capa:*

Esta capa de relleno es colocada por encima de la segunda capa de piedra (cerito) con el fin de ocupar los espacios vacíos que se puedan tener en la capa superior, este compuesto por una mezcla de material de trituración 6ta (30%) y arena de yacimiento NP (70%).

Dicha mezcla es puesta en pista con equipos manuales en una proporción de 40kg/m<sup>2</sup> de base de macadam, seguidamente se procede a compactar la base con dos pasadas de los compactadores tipo liso y neumático, teniendo en cuenta que por cada pasada de compactador corresponde una pasada del camión regador. Finalmente se protege la base de macadam hidráulico con un riego de imprimación.

*Ilustración 13: Esparcido de material de relleno para la segunda capa*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 14: Esparcido de material de relleno para la segunda capa*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 15: Compactación del material de relleno segunda capa*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 16: Riego del relleno de la segunda capa*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 17: Imprimación de la capa superior de macadam.*

*Fuente: Elaboración propia.*



Esta mezcla de materiales rocoso y materiales de rellenos conforman la capa base de Macadam hidráulico

## **1.7. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO**

En el Capítulo 1, se describe en forma resumida los objetivos propuestos y el alcance que se desarrollan en el trabajo de investigación.

En el Capítulo 2, Se expone la revisión teórica de términos básico y conceptos de ingeniería que se deben tener en cuenta para encarar esta investigación.

En el Capítulo 3, Se presenta la Metodología en el cual se detallan los trabajos a llevar a cabo en este trabajo de investigación.

En el Capítulo 4, caracterización de materiales se describen los distintos materiales utilizados para la construcción de la base de Macadam Hidráulico, con los respectivos ensayos.

En el Capítulo 5, análisis de los resultados de deflectometría, se presentan el ensayo de deflectometría realizado en el tramo y por su puesto el retrocálculo de los resultados obtenidos de dichos ensayos.

En el Capítulo 6, consiste en la verificación del paquete estructural utilizando los parámetros o datos de entrada según los resultados de los ensayos realizados con el retroanálisis.

En el Capítulo 7, se describen las especificaciones técnicas a tener en cuenta para la construcción de la capa base de macadam hidráulico, junto con una verificación con respecto a las EETT aplicadas normalmente para la construcción de la capa de macadam.

En el Capítulo 8, Se presentan las conclusiones del trabajo final de grado, además de orientaciones y recomendaciones.

## CAPITULO 2

### MARCO TEORICO

#### 2.1. DEFINICION DE TERMINOS BASICOS

**Pavimento:** Comúnmente se define el pavimento como un conjunto de capas superpuestas horizontalmente, formadas por diversos materiales sueltos o tratados con una sustancia aglomerante, cuya misión es transmitir adecuadamente las cargas generadas por el tránsito, de tal forma que las capas subyacentes no se deformen en límites inadmisibles durante el periodo de proyecto. [1]

El pavimento debe ser capaz de resistir las sollicitaciones de cargas dinámicas y aportar una serie de propiedades que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios en forma duradera.

La actual concepción de la estructura multicapa, unida al desarrollo de nuevas técnicas, deriva en la generación de infinidad de secciones diseñadas específicamente para determinadas situaciones de carga. No obstante, puede hacerse una síntesis de todas ellas en dos grupos, pavimentos rígidos, compuestos principalmente por estructuras de hormigón, y los pavimentos flexibles, formados por capas bituminosas y granulares.

**Capa Superficial o Carpeta de Rodadura:** La capa superficial o carpeta de rodadura de una estructura flexible consiste de una mezcla de agregados minerales y materiales bituminosos colocada en la parte más superior y usualmente construida sobre una capa base. Además de su función principal como una parte estructural del pavimento, debe también ser diseñada para:

resistir las fuerzas abrasivas del tráfico, reducir la cantidad de agua superficial que puede penetrar en el pavimento, proveer una superficie resistente al patinaje y proporcionar una superficie de manejo lisa y uniforme. [1]

**Capa Base:** La capa de la base es la porción de la estructura del pavimento inmediatamente debajo de la capa de superficie. Se construye sobre la subbase o, si no se usa subbase, directamente sobre la subrasante. Su función más importante en el pavimento es el soporte estructural. [1]

**Macadam Hidráulico:** El Macadam hidráulico consiste en una o más capas de piedra triturada compactado con las partículas firmemente entrelazadas, y los huecos llenos con material de relleno, con ayuda de lubricación con agua. [2]

**Deflectómetro de Impacto:** El deflectómetro de impacto es un equipo que simula mediante un impacto sobre la superficie del pavimento las condiciones de esfuerzo generadas por los vehículos. Dentro de su sistema de medición posee una serie de geófonos que le permiten obtener los valores de deflexiones superficiales de la estructura por efecto del impacto a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga.

**Retrocálculo:**

Se define retrocálculo como el proceso matemático mediante el cual, las medidas de deflexiones tomadas en campo por un equipo deflectométrico son transformadas a módulos elásticos de la estructura evaluada.

**Modulo Resiliente:**

Cuando un vehículo circula sobre el pavimento, sus ruedas transmiten cargas al interior de la estructura y el suelo de fundación, dicha carga genera un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se considerarán relacionado entre si a través del módulo de elasticidad y la razón de Poisson propios del material. Sin embargo, la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos muestra que, bajo pulsos de carga dinámica como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de

materiales no presentan un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de Modulo Resiliente, que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables. [1]

### **Granulometría:**

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda conocer las constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se pueda conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría). [3]

*Ilustración 18: Tamices superpuestas [3]*

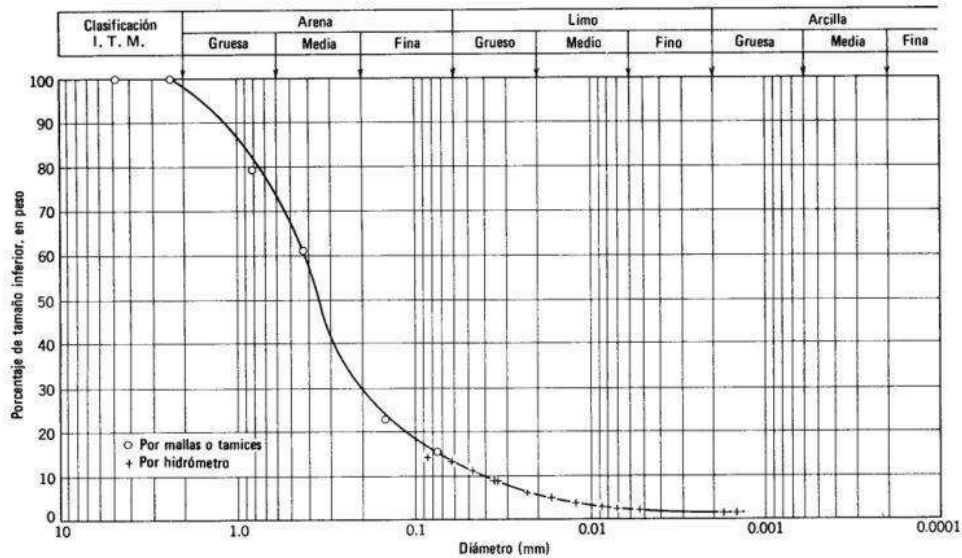


### **Curva granulométrica:**

La curva granulométrica es una representación gráfica de los resultados del ensayo de granulometría.

Se representa gráficamente en un papel denominado “log-normal” por tener en la horizontal una escala logarítmica, y en la vertical una escala natural.

Ilustración 19: Curva granulométrica [3]



La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva, donde el porcentaje que pasa es graficado en las ordenadas y el diámetro de las partículas en las abscisas. A partir de la curva anterior, se puede obtener diámetros característicos tales como el D10, D30, D60, D85, etc. El D se refiere al tamaño del grano, o diámetro aparente de la partícula y el subíndice (10, 30, 60, 85) se denota el porcentaje de material más fino.

## 2.2. MATERIALES PETREOS

Se conoce como material pétreo a los conjuntos de agregados mono o poliminerales que constituyen la litosfera y que se presenta consolidados, cementados, aglomerados o de cualquier otra forma, como resultado de diversos procesos geológicos.

Las rocas o piedras naturales, al ser materiales esencialmente heterogéneos, pueden agruparse de diversas maneras, siendo algunas de estas la clasificación por texturas y mineralogía, por su comportamiento a esfuerzos mecánicos, por su origen geológico e incluso por su modo de comercialización según la Masonry Institute of America (MIA).

## **2.2.1 CLASIFICACIÓN DE ROCAS POR SU FORMACIÓN GEOLÓGICA.**

La manera más común de agrupar los tipos de rocas existentes en el planeta es por su formación geológica, donde destacan las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

### **2.2.1.1 Rocas Eruptivas o Ígneas.**

Las rocas ígneas se forman por la consolidación del magma del interior de la tierra. Si el enfriamiento de este magma es relativamente rápido y en zonas superficiales, se lo denomina rocas volcánicas, en cambio, si este proceso es más lento y a profundidades mayores de la corteza, se les denomina rocas plutónicas.

De los 16km superiores de la corteza terrestre, las rocas ígneas comprenden un total aproximado de 95%, no obstante, no se manifiesta en superficie, debido a que una gran parte de esta se encuentra recubierta de roca sedimentarias y en menor medida de metamórficas.

Dentro de las rocas ígneas existen subclasificaciones por factores diversos como por el tamaño de los cristales que las componen, en donde se pueden encontrar las rocas afaníticas (grano fino), faneríticas (granos gruesos), pórfidas (granos finos y gruesos), vítricas (cristales desordenados), piroclásticas (fragmentos de roca) y pegmatítica (grano muy grueso), lo que depende fundamentalmente del tiempo de enfriamiento del magma.

Otra manera de clasificarlas es por su composición mineral, por ejemplo, dependiendo de los minerales predominantes que la conforman. En esta clasificación encontramos las rocas félsicas o granitos, ricas en

feldespatopotásico y cuarzo, las rocas intermedias o andesíticas, ricas en anfibolitas y plagioclasas y las rocas basálticas o máficas. [4]

Tabla 1: Clasificación mineral de rocas ígneas [4]

COMPOSICION MINERAL	ROCAS
Rocas félsicas o granitos	Granito, Riolita, Obsidiana, Pumicita
Intermedias o andesíticas	Andesita, Diorita
Basálticas o máficas	Basalto, Gabro

Ilustración 20: Ejemplos de rocas ígneas



a) Granito; b) Basalto; c) Diorita; d) Obsidiana.

### 2.2.1.2 Rocas Sedimentarias.

Son rocas que se forman en la superficie terrestre a partir de la compactación de fragmentos rocosos que derivan de la destrucción de otras rocas preexistentes y que se acumulan mecánicamente en determinadas zonas por la acción del agua, del viento o de glaciares (grava, arena y arcilla).

Según el tamaño de los clastos de rocas sedimentarias pueden clasificarse en lutita, arenisca, conglomerados y brechas, o en limonita.

Su origen se diferencia en marinas o continentales y presentan valores de resistencias mecánicas variables para su trabajo y talla. [4]

Ilustración 21: Ejemplos de rocas sedimentarias. [4]



a) Granito; b) Basalto; c) Diorita; d) Obsidiana.

### 2.2.1.3 Rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas se originan de rocas preexistentes (ígneas, sedimentarias o metamórficas), por cambios mineralógicas, texturales y estructurales. Estos cambios pueden ser el resultado de variaciones importantes de temperatura y presión producidas a diferentes profundidades en la corteza terrestre. Se pueden clasificar según su textura en foliadas (pizarras, filitas, esquistos, gneises) y no foliadas (mármoles, cuarcitas, coneanas).

Las rocas metamórficas más conocidas son las siguientes:

*Pizarras:* Proviene de rocas sedimentarias, fundamentalmente arcillosas, sometidas a altas presiones. Se caracteriza por su tamaño de grano muy fino y colores oscuros, así como por poseer una intensa orientación planar, denominada foliación o esquistosidad, que está determinada por la disposición de sus minerales laminares (filosilicatos), lo que le permite el lajado en placas muy finas, impermeable y con buena resistencia a la flexión.

*Mármoles:* Derivan de las calizas, por lo que se conforman principalmente por carbonato cálcico, que han sufrido procesos de recristalización. Esto les proporciona una gran dureza y permite, mediante el pulido, la obtención de un perfecto brillo con altos valores de resistencia mecánica.

**Cuarcitas:** Son las consecuencias de un proceso de recristalización de areniscas ricas en cuarzo. Son rocas muy compactas, duras, homogéneas y con valores de resistencia elevadas.

**Gneises:** Presentan tamaños de granos de finos a gruesos con una foliación neta, caracterizada por bandas oscuras ricas en minerales ferromagnéticas que se alternan con otras claras ricas en cuarzo y feldespatos. Son rocas duras, de superficie áspera no totalmente uniforme. [4]

*Ilustración 22: Ejemplo de rocas metamórficas. [4]*



a) Gneis; b) Cuarcita; c) Mármol; d) Piedra pizarra.

#### **2.2.1.2.1. Basalto.**

El basalto es una roca ígnea extrusiva, sólida y negra. Es el tipo de roca más común en la corteza terrestre, y cubre la mayoría del fondo oceánico. Está formada por abundantes minerales oscuros como el piroxeno y la olivina, que hace que el basalto sea de color gris o negro oscuro. El basalto también tiene cantidades menores de minerales de color claro como, el feldespato y el cuarzo.

El basalto se forma cuando la lava llega a la superficie de la tierra proveniente de un volcán, o de una cordillera en medio del océano. Cuando llega a la superficie, la lava se encuentra a temperaturas que oscilan entre los 1100 a 1250° Centígrados, pero se enfría rápidamente, en unos días o un par de semanas, convirtiéndose en roca sólida. La lava muy gruesa puede tardar muchos años en solidificarse totalmente. [5]

#### **2.2.1.2.2. Características.**

Roca volcánica básica, de color oscuro, normalmente negra o verde oscuro por la alteración de minerales ferromagnéticas piroxenos y olivino. En superficies muy alteradas el color puede ser rojizo por la liberación de óxidos de hierro procedentes de la alteración de piroxenos o del vidrio volcánico. Su textura suele ser vítrea (solo está compuesta por vidrio volcánico) masivo o vacuolar, microcristalina (con cristales solo visible al microscopio o porfídica) con microcristales y fenocristales. Su estructura es prismática, cuando las lavas basálticas se consolidan forman una serie de columnas hexagonales.

#### **2.2.1.2.3. Composición química.**

El basalto es una roca de composición química básica, es decir que tiene entre 45 al 52% de SiO<sub>2</sub> (sílice), es decir, tienen entre 46% al 85% de minerales máficas (oscuros) o minerales ferromagnesianos como piroxenos, anfíboles y olivino. [6]

#### **2.2.1.2.4. Textura.**

El basalto se caracteriza por tener textura afanítica debido a que el enfriamiento brusco de la lava no permite que se formen cristales, sin embargo, en estudios petrográficos mediante lámina delgada, es posible diferenciar a los minerales principales que son plagioclasas cálcicas y piroxenos.

En ciertas ocasiones puede presentar textura porfídica, porque el basalto puede estar conformando diques basálticos y su enfriamiento es muy cercano a la superficie.

También puede tener textura vítrea si el enfriamiento de la lava es muy brusco, por lo que estaría compuesta de alto porcentaje de vidrio volcánico. [6]

#### **2.2.1.2.5. Minerales principales y accesorios.**

El basalto tiene 46% al 85% de minerales ricos en hierro y magnesio, los minerales principales son: plagioclasa cálcica (Anortita) y piroxeno, mientras que los minerales accesorios son: olivinos. [6]

#### **2.2.1.2.6. Uso frecuente del Basalto.**

Es corrientemente utilizada en adoquinados y en construcción como piedra picada luego de ser triturada para la mezcla de concreto. Dada su dureza, densidad y facilidad de troceado, resulta buena roca para puertos, por su resistencia al desgaste, adherencia y escasa absorción es un material de buen uso en carreteras, tanto como material de base, subbase o rodadura como para escolleras y rellenos. [5]

### **2.3. INTRODUCCION A LA VIALIDAD**

#### **2.3.1. TIPOS DE VIAS.**

Las vías de transporte están destinadas fundamentalmente a servir el tránsito de paso, a dar acceso a la propiedad colindante o bien dar un servicio que sea combinación de ambas posibilidades.

Entre los tipos de vías podemos mencionar las siguientes:

##### **2.3.1.1. Carreteras.**

Vías características de alto diseño proyectado para acomodar importantes volúmenes de tránsito de paso circulando a velocidades elevadas

### **2.3.1.2. Caminos.**

Vías de características geométricas medias a mínimas adecuada para dar servicio a volúmenes moderados y bajos de tránsito. [7]

## **2.3.2. FUNCIONES DE LOS TIPOS DE VIAS.**

### **2.3.2.1. Carreteras.**

Permitir el tránsito ininterrumpido a elevados volúmenes de demanda de tránsito, en los que coexistirán vehículos rápidos y lentos (automóviles y camiones).

Consecuentemente deberá siempre contar con pavimentos de tipo superior. Se debe posibilitar velocidades de desplazamiento elevadas que pueden ser mantenidas a lo largo de toda la vía en condiciones seguras.

Altos volúmenes de tránsito justifican inversiones altas.

### **2.3.2.2. Caminos.**

Su función principal es dar acceso a la propiedad adyacente. La velocidad de circulación es una consideración secundaria y por tanto le corresponderán valores más bien bajos.

Los caminos rara vez presentan problemas de congestión, pero es común que la evolución del tránsito de una vía construida inicialmente con una capa de grava llegue a justificar una superficie de rodadura pavimentada.

En efecto, los volúmenes de tránsito pueden fluctuar entre varios cientos y algunos miles de vehículos, pudiendo preverse problemas de congestión que obliguen a consultar ampliaciones a lo largo de la vida económica de la vía. [7]

### **2.3.3. PAVIMENTOS.**

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. [8]

#### **2.3.3.1. Características que debe de tener un pavimento**

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje, etc.

#### **2.3.3.2. Clasificación de los pavimentos**

En nuestro medio los pavimentos se clasifican en:

- Pavimentos flexibles
- Pavimentos semi-rígidos
- Pavimentos rígidos

- Pavimentos articulados

### **2.3.3.3. Pavimentos flexibles**

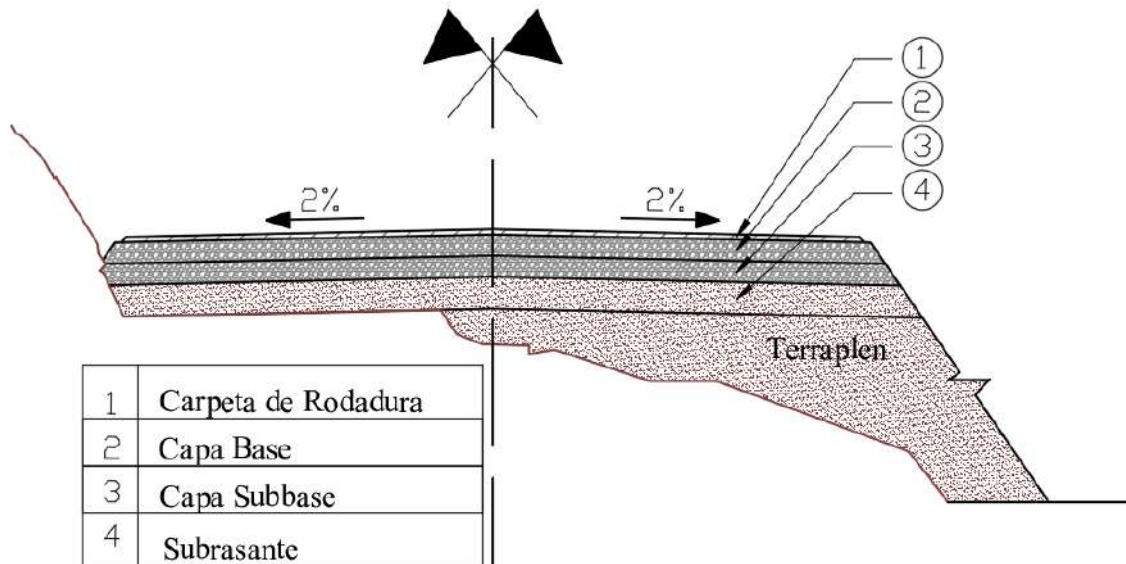
Los Pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y subbase; sin embargo, es posible prescindir de estas capas dependiendo de la calidad de la subrasante y de las necesidades de cada obra. Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, se extiende en ella, entonces pasa estas cargas a la siguiente capa inferior.

Por lo tanto, la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga, por lo tanto, la capa superior será la que posee la mayor capacidad de carga de material (y la más cara) y la de más baja capacidad de carga de material (y más barata) ira en la parte inferior. [8]

### 2.3.3.4. Funciones de las capas de un pavimento flexible.

Ilustración 23: Sección Transversal de Pavimento Asfáltico

Fuente: Elaboración Propia



- Carpeta o capa de rodadura: Es la capa más superficial y tiene como principal función proporcionar una superficie segura, cómoda y estable en el tránsito vehicular; además de actuar como capa impermeable para impedir la infiltración de agua en la estructura del pavimento. Puede estar compuesta por uno o varias capas asfálticas
- Base: Esta es la capa que se encuentra directamente debajo de la capa Superficial y es la encargada de recibir los esfuerzos de la capa de rodadura y transmitirlo de forma adecuada a la subbase y a la subrasante. En general, se compone de agregados (ya sea estabilizado o sin estabilizar).
- Capa Subbase: Se considera una capa netamente económica, debido a que el contenido de sus materiales es muy asequibles y económicos. Tiene la función de actuar como capa de transición entre la base y la

subrasante, puesto que impide la penetración de materiales finos de la subrasante así, como la ascensión capilar. [8]

### **2.3.3.5. Clasificación de materiales para base y subbase.**

Entre los materiales que puedan utilizarse como base y subbase del paquete estructural puede mencionarse los siguientes:

- *No ligadas*: Granulares (mezcla de suelo-agregado)

Compuestos principalmente por agregados pétreos y finos naturales, su resistencia a la deformación está determinada casi exclusivamente por el rozamiento interno de los agregados, aunque a veces existe una componente cohesional brindada por los finos plásticos del material.

- *Ligadas*: Estabilizaciones con aditivos

Modificación de un suelo o un agregado procesado, mediante la incorporación y mezcla de productos que generan cambios físicos y/o químicos del suelo aumentando su capacidad portante, haciendo menos sensible a la acción del agua y, eventualmente, elevando su rigidez.

- *Marginales*: Naturales, subproductos industriales y materiales de desecho.

Materiales que no cumplen las especificaciones corrientes para uso vial, pero que pueden ser usado con éxito, principalmente como resultado de una experiencia local satisfactoria y un costo reducido.

### **2.3.3.6. Caracterización de Bases y Subbases Granulares.**

Los agregados para construcción de base y subbase granulares y, en general, para cualquier capa de un pavimento deben ser caracterizados para:

- Establecer su idoneidad
- Obtener información útil para el diseño estructural del pavimento.

La composición mineralógica de los agregados determina en buena medida sus características físicas y la manera de comportarse como materiales para una capa de pavimento.

Por lo tanto, al seleccionar una fuente de materiales, el conocimiento del tipo de roca y, por lo tanto, de minerales que la componen brinda una excelente pista sobre la conveniencia de los agregados provenientes de ella. [9]

Las propiedades químicas de los agregados son importantes cuando se van a emplear en pavimentos, la química de los agregados puede determinar la adherencia entre ellos y el asfalto.

Tabla 2: Propiedades Ingenieriles de las Rocas (Según Cordon y Beste). [9]

Tipo de roca	Resistencia mecánica	Durabilidad	Adherencia	Textura superficial	Estabilidad química
<b>Ígnea</b> Granito, diorita, sienita Basalto, diabasa, gabro	Buena Buena	Buena Buena	Regular Buena	Buena Buena	Buena Buena
<b>Sedimentaria</b> Caliza, dolomita, Arenisca Chert Shale	Buena Regular Buena Pobre	Regular Regular Regular Pobre	Buena Buena Pobre Buena	Buena Buena Regular Buena	Buena Buena Regular Buena
<b>Metamórfica</b> Gneiss, esquisto Cuarcita Mármol Anfibolita Pizarra	Buena Buena Regular Buena Buena	Buena Buena Buena Buena Regular	Buena Buena Buena Buena Buena	Buena Buena Buena Buena Pobre	Buena Buena Buena Buena Buena

### 2.3.4. TIPOS DE ENSAYOS.

#### 2.3.4.1. GRANULOMETRIA DE SUELOS

Granulometría:

Se refiere a las propiedades relativas en que se encuentran las diferentes partículas minerales del suelo (grava, arena, limo y arcilla) expresada con base al peso seco del suelo (en porcentaje) después de la destrucción de los agregados.

La granulometría estudia la distribución de las partículas que conforman un suelo según su tamaño, lo cual ofrece un criterio obvio para una clasificación descriptiva. La variedad del tamaño de las partículas casi es ilimitada.

*Ilustración 24: Material pétreo, cantera el Camino*

*Fuente: Elaboración propia*



Tamaño de las partículas de suelo:

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas, que conforman el suelo, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas, ocasionalmente puede tener materia orgánica.

La textura y propiedades físicas del suelo dependerán del tamaño de ellas.

Mayor tamaño de partículas significa mayor espacio entre ellas, resultando un suelo más poroso; menor tamaño de partículas tendrá menor espacio entre ellos dificultando el paso del aire y el agua, por lo tanto, este suelo será menos

poroso. Los tamaños de granos se han clasificado con base en las dimensiones dadas en determinados estándares.

Cuando se realiza un análisis físico de una muestra de suelo se definen dentro de ella variados tamaños de grano que se enmarcan dentro de rangos especificado definido por diversas entidades o agrupaciones. Para clasificar a los constituyentes de suelo según su tamaño de partículas se han establecidos variados métodos para la clasificación granulométrica y básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero suelen diferir en los valores de los límites establecidos para definir cada clase.

Las fracciones tendrán denominaciones, según el sistema:

*Tabla 3: Diámetros de las partículas de agregado según las diferentes normativas*

TIPO DE SUELO	BRITANICO $\phi$ (mm)	AASHTO $\phi$ (mm)	ASTM $\phi$ (mm)	SUCS $\phi$ (mm)
Grava	60 – 2	75 – 2	> 2	75 – 4.75
Arena	2 – 0.06	2 – 0.05	2 – 0.075	4.75 – 0.075
Limo	0.06 – 0.002	0.05 – 0.002	0.075 – 0.005	< 0.075 finos
Arcilla	< 0.002	< 0.002	< 0.005	

#### **2.3.4.2. LIMITES DE ATTERBERG**

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico.

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

Para obtener estos límites se requiere remoldear (manipular) la muestra de suelo destruyéndose su estructura original y por ello es que una descripción del suelo en sus condiciones naturales es absolutamente necesarias y complementarias.

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

Contenido de humedad: Razón entre peso del agua y peso del suelo seco de una muestra. Se expresa en porcentaje.

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Límite Líquido: Contenido de humedad del suelo en el límite entre el estado semi-líquido y plástico.

Límite Plástico: Es el contenido de humedad del suelo en el límite entre los estados semi-sólidos y plástico.

Índice de Plasticidad: Es la diferencia entre los límites líquido y plástico, es decir, el rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene plástico.

$$IP = L_L - L_P$$

Ilustración 25: Equipo de Casa Grande



### 2.3.4.3. ENSAYO DE COMPACTACION

Concepto:

Proceso de aplicación de energía mecánica al suelo para disminuir su volumen por reducción de relación de vacíos debida a eliminación de aire de poros.

Objetivos de la Compactación:

- Mejorar propiedades mecánicas de los suelos.
- Generar a partir de un suelo un material con las propiedades mecánicas apropiadas.

Efectos físicos y Mecánicos:

- Reducción del índice de vacío y aumento del peso específico.
- Aumento de la resistencia
- Disminución de la deformación
- 

Factores que influyen en la compactación:

Proctor: Prueba de laboratorio consistente en compactar suelo por impacto variado contenido de humedad.

Los factores que influyen en la compactación son:

- Contenido de humedad.
- Energía específica de compactación
- Tipo de suelo.

Tipos de compactación según la AASTHO:

Proctor normal:

El ensayo Proctor estándar persigue determinar la densidad seca máxima de un suelo y la humedad óptima necesaria para alcanzar esta densidad. Para ello se utiliza un molde cilíndrico de 1 litro de capacidad que se rellena con 3 capas de material debidamente compactadas mediante una maza estandarizada de 2.5 kg que se deja caer libremente una altura de 305mm.

Con este procedimiento Proctor observo que, para un suelo dado, a contenido de humedad creciente incorporado a la masa del mismo, se obtienen densidades secas sucesivamente más altas (mejor grado de compactación). Así mismo, se percató que esa tendencia no se mantenía indefinidamente si no que, al superar un cierto valor de humedad agregada, las densidades secas disminuían, con lo cual las condiciones empeoraban. Es decir, puso en evidencia que, para un suelo dado y a determinada energía de compactación, existe un valor de "Humedad Óptima" con la cual puede alcanzarse la "Máxima Densidad Seca".

El ensayo Proctor también es conocido como Ensayo AASTHO T-99 (American Association of State Highway and Transportation Officials – Asociación Americana de Agencias Estatales de Carreteras y Transportes).

*Ilustración 26: Equipos de clasificación y Proctor Normal*



Proctor Modificado:

En tiempos de la Segunda Guerra mundial se introdujo el Ensayo Proctor Modificado (ASTM T-180), como respuesta a las exigencias de subrasantes más densas en aeropistas, demandadas por los pesados equipos de aviación militar que se desarrollaron por entonces. Este ensayo modifico el Proctor normal aumentando el número de capas de 3 a 5, el número de golpes en cada una de ellas se llevó de 25 a 55, el peso del pistón se elevó a 4.5 (kg) y la altura de caída a 45.7(cm). Básicamente con ello se evitó incrementar las compactaciones relativas por encima del 100% del Proctor Normal o Estándar, y la dificultad que presentan algunos suelos en ser compactados en campo cuando su humedad óptima, determinada por esa última prueba, es cercana al Limite Plástico.

Comparando los resultados entre ambos, para un mismo suelo, se puede comprobar que el Modificado provee valores de Densidad Seca Máxima más elevados, a consecuencia de la mayor energía adoptada, en correspondencia con menores valores de humedad óptima.

La elección del tipo de ensayo a efectuar dependerá, básicamente, de la naturaleza de la obra a realizar.

*Ilustración 27: Equipo de clasificación de suelo, Proctor Modificado*



#### **2.3.4.4. ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE CON LA MAQUINA DE LOS ANGELES**

Cuando los áridos van a utilizarse en obras en las que va a estar sometido a desgaste o a impacto, es importante conocer la tenacidad de los mismos y su resistencia al impacto.

Unos de los métodos más empleados es el ensayo Los Ángeles. Con él se determina la resistencia a la fragmentación por choque de los áridos gruesos empleados.

El ensayo de Los Ángeles es muy útil debido a que da una buena correlación, no solo con el desgaste por fragmentación sino también con la resistencia a compresión del mismo.

Según la NORMA IRAM 1532/71, expresa lo siguiente:

Normas a consultar:

- Para separar el material por su granulometría se usarán los tamices descritos en la norma IRAM 1501.
- La extracción de muestras se realiza de acuerdo con la norma IRAM 1509.

Alcance de esta norma:

Esta norma se refiere al método de ensayo de abrasión de los agregados gruesos usando la máquina de los Ángeles.

Inspección y Recepción:

- La muestra destinada al ensayo se obtendrá separando por tamizado las distintas fracciones del agregado.
- Se lavará separadamente cada una de las fracciones secándola a 105°C a 110°C hasta masa constante.
- Se mezclarán las fracciones eligiendo en la tabla siguiente el tipo que más se acerque al agregado usado en la obra, hasta completar unos 5000 g de muestra.

Tabla 4: Granulometría según tipo de ensayo

Tipo	Pasa tamiz IRAM	Retenido tamiz IRAM	Cantidad de muestra (%)
A	38 mm (1 1/2")	25 mm (1")	25
	25 mm (1")	19 mm (3/4")	25
	19 mm (3/4")	12,7 mm (1/2")	25
	12,7 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	25
B	19 mm (3/4")	12,7 mm (1/2")	50
	12,7 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	50
C	9,5 mm (3/8")	6,3 mm (N°3) ó (1/4")	50
	6,3 (N°3) ó (1/4")	4,8 mm (N°4)	50
D	4,8 mm (N°4)	2,4 mm (N°8)	100

Método de Ensayo:

- 1) La máquina Los Ángeles empleada en el ensayo esta constituida de la siguiente forma:
  - a) Un tambor cilíndrico hueco de acero de aproximadamente 500mm de longitud y 700mm de diámetro, con su eje horizontal fijado a un dispositivo exterior que pueda transmitirle un movimiento de rotación alrededor del mismo. El tambor tiene una abertura, para la introducción del material a ensayar y de la carga abrasiva. Dicha abertura esta provista de una tapa que debe reunir las condiciones siguientes:
    - a.1) Asegurar un cierre hermético que impida la perdida de material y del polvo;

a.2) Mantener la forma de la pared interna del tambor, excepto en caso de que, por la disposición de la pestaña que se menciona mas abajo, se tenga la certeza de que el material no puede tomar contacto con la tapa durante el ensayo

a.3) Tener un dispositivo de sujeción que asegure la fijación rígida al tambor y, al propio tiempo, la facilidad de su remoción.

El tambor tiene fijada interiormente y a lo largo de una generatriz, una pestaña o saliente de acero que se proyecta radialmente con un largo de aproximadamente de 90mm. Esta pestaña debe estar montada mediante pernos u otros medios que aseguren su firmeza y rigidez. La posición de la pestaña debe ser tal, que la distancia de la misma hasta la abertura, medida sobre la pared del cilindro en la dirección de la rotación no sea menor de 1250mm. La pestaña puede reemplazarse con un hierro en ángulo fijado interiormente a la tapa de la boca de entrada, en cuyo caso el sentido de rotación debe ser tal, que la carga sea arrastrada por la cara exterior del ángulo.

b) La carga abrasiva consiste en esferas de fundición o de acero, de aproximadamente 48mm de diámetro y entre 390 y 445 g de masa, cuya cantidad depende del material que se ensaya, tal como se indica a continuación.

Tabla 5: Numero y masa de esferas según tipo de ensayo

<b>Tipo</b>	<b>Número de esferas</b>	<b>Masa de las esferas (g)</b>
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

- 2) Se pesa unos 5000 g de muestra seca, con la precisión del gramo, u se coloca junto con la carga abrasiva dentro del cilindro, haciéndolo girar con velocidad entre 30 y 35v/min, hasta completar quinientas vueltas.
- 3) Se retira el material del cilindro y se tamiza por el tamiz IRAM 1.7mm (Nº12).

- 4) Se lava y seca como se indica en el apartado inspección y recepción, Y se pesa con la precisión del gramo el material retenido en el tamiz.
- 5) El porcentaje de pérdida por abrasión se calcula con la formula siguiente:

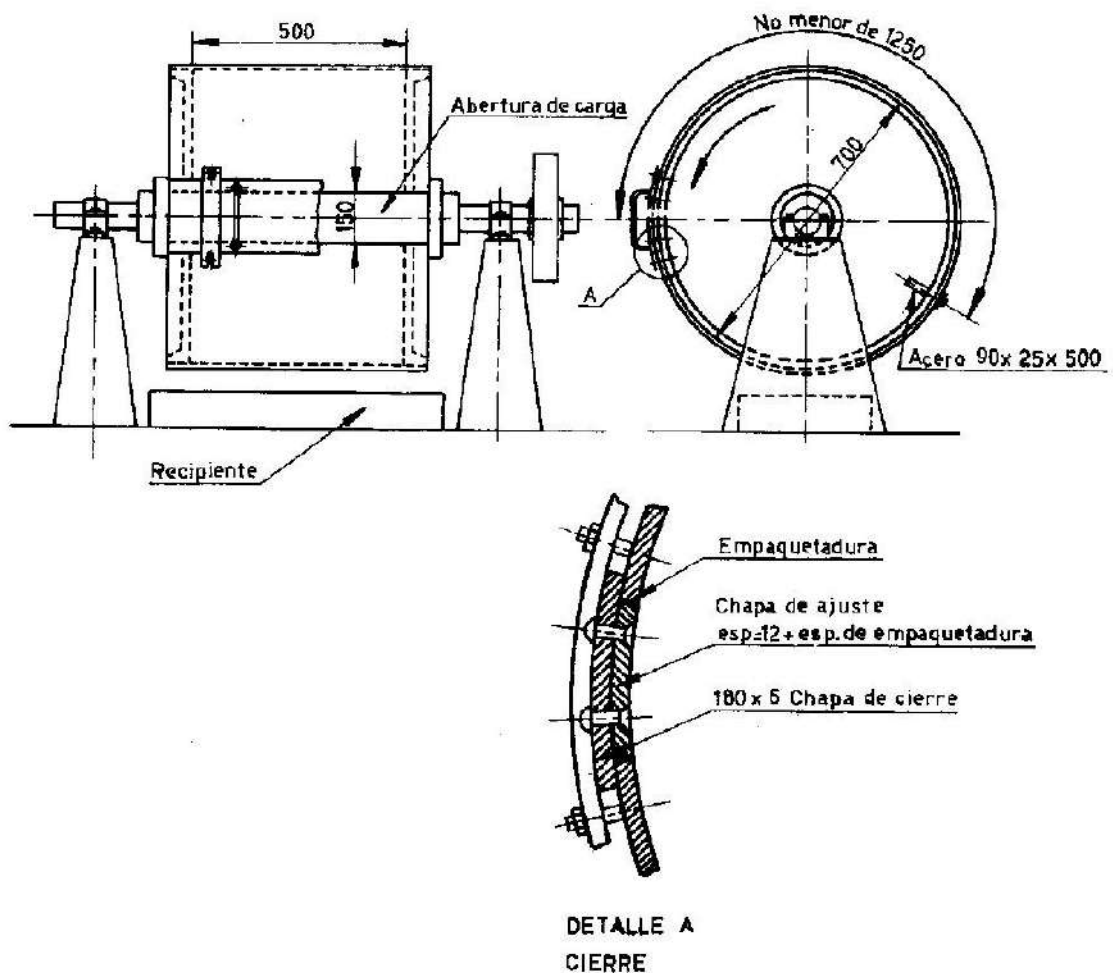
$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100$$

siendo:

P: la pérdida por abrasión, en por ciento;

m: la masa de la muestra seca (2), en gramos;

m1: la masa del material retenido (4.), en gramos



### **2.3.4.5. FACTOR DE CUBICIDAD:**

a) Definición:

Valor numérico que permite formular un juicio sobre las características de forma de las partículas de un agregado grueso. Este factor de Cubicidad toma valores próximos a uno para agregados de Cubicidad optima y valores próximos a cero para los de Cubicidad deficiente (partículas sumamente achatadas o lajosas).

b) Métodos de ensayo:

b.1) Fundamento: Este ensayo consiste en relacionar la dimensión mínima, con la medida de las partículas de un agregado pétreo, mediante operaciones de zarandeo o a través de placas reductoras, y tiene por objeto determinar las características de forma de las partículas que constituyen el agregado, definiendo la misma por el valor que resulta para su factor de Cubicidad.

b.2) Instrumentos:

a) Tamices de abertura circulares: IRAM 75mm, IRAM 63mm, IRAM 53mm, IRAM 37.5mm, IRAM 31.5mm, IRAM 26.5mm, IRAM 19mm, IRAM 16mm, IRAM 13.2mm, IRAM 9.5mm, IRAM 6.7mm e IRAM 2.36mm.

b) Juego de placas reductoras de las dimensiones y características indicadas en la figura 6, que comprende un par de placas, la placa reductora tipo I y la placa reductora tipo II, para cada tamiz IRAM, indicado en 2.2/a, salvo para los tamices IRAM 6.7mm de IRAM 2.36mm.

c) Mareo de zarandeo para la sujeción de las placas reductoras, de las dimensiones y características indicadas en la Figura 7.

d) Balanza que aprecie el 1 g.

e) Estufa capaz de mantener una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

b.3) Muestra

2.3.1) Preparación del material: Se lava el agregado grueso a ensayar, sobre el tamiz IRAM 2.36 mm, se seca en estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante y se fracciona, de acuerdo con la norma IRAM 1505, a través de los tamices indicados en 2.2/a.

b.3.2) Elección de la granulometría: Se elige en la tabla 1 la granulometría mas representativa del agregado en estudio, en base a la clasificación realizada según 2.2/a.

Tabla 6: Composición granulométrica de las muestras por ensayar

Granulometría	Fracción	Pasa por tamiz (tamaño directriz)	Retenido en el tamiz	Cantidad necesaria	
				parcial	total
				(kg)	(kg)
A	1	IRAM 75 mm	IRAM 63 mm	3	12
	2	IRAM 63 mm	IRAM 53 mm	3	
	3	IRAM 53 mm	IRAM 37,5 mm	3	
	4	IRAM 37,5 mm	IRAM 31,5 mm	3	
B	1	IRAM 31,5 mm	IRAM 26,5 mm	2	6
	2	IRAM 26,5 mm	IRAM 19 mm	2	
	3	IRAM 19 mm	IRAM 16 mm	2	
C	1	IRAM 19 mm	IRAM 16 mm	2	6
	2	IRAM 16 mm	IRAM 13,2 mm	2	
	3	IRAM 13,2 mm	IRAM 9,5 mm	2	
D	1	IRAM 13,2 mm	IRAM 9,5 mm	1	2
	2	IRAM 9,5 mm	IRAM 6,7 mm	1	

b.3.4) Obtención de la muestra: Se obtiene, por tamizado del material preparado según 2.2/a, la cantidad de muestra correspondiente a cada fracción de la granulometría elegida, que se indica en la tabla 1.

b.4) Procedimiento:

b.4.1 Se tamiza cada una de las fracciones componentes de la muestra, de acuerdo con su tamaño directriz (ver tabla 6), a través de las placas reductoras tipo 1 y tipo 2 (tabla 7), hasta que no pase más del 1%, en masa, de a muestra.

Tabla 7: Abertura de las placas reductoras

Tamaño directriz	ABERTURAS DE LAS PLACAS REDUCTORAS	
	Tipo I (mm)	Tipo II (mm)
IRAM 75 mm	38,1	25,4
IRAM 63 mm	31,7	21,2
IRAM 53 mm	25,4	16,9
IRAM 37,5 mm	19,0	12,7
IRAM 31,5 mm	15,9	10,6
IRAM 25,5 mm	12,7	8,5
IRAM 19 mm	9,5	6,3
IRAM 15 mm	7,9	5,3
IRAM 13,2 mm	6,3	4,2
IRAM 9,5 mm	4,7	3,2

2.4.2 Se pesa, al gramo, el material retenido sobre las placas reductoras correspondientes a cada tamaño directriz.

b.5) Calculo

2.5.1 Se calcula la cantidad de los agregados gruesos en cada placa reductora, en por ciento, mediante la fórmula siguiente:

$$R = \frac{m_i}{m_t} \times 100$$

Siendo:

R = La cantidad de los agregados retenidos en cada placa reductora, en por ciento;

$m_i$  = La masa del material retenido en una determinada placa reductora, correspondiente a cada tamaño directriz, en gramos;

$m_t$  = La masa total del material correspondiente a cada fracción, en gramo.

2.5.2 Se calcula el factor de Cubicidad mediante la fórmula siguiente:

$$f = \frac{\sum R_{I+1/2} + \sum R_I}{100n}$$

Siendo:

f = el factor de Cubicidad;

$\sum R_I$  = La masa de los retenidos parciales por las placas reductoras tipo I, en por ciento;

$\sum R_{II}$  = La suma de los retenidos por las placas reductoras tipo II, en por ciento;

n = [10]

#### **2.3.4.6. DETERMINACION DE ATAQUE POR SULATO EN AGREGADO:**

a) Instrumental:

a.1 Para realizar el ensayo es necesario disponer del instrumental siguiente:

a.1.1 Tamices: IRAM 150  $\mu\text{m}$ ; IRAM 300  $\mu\text{m}$ ; IRAM 600  $\mu\text{m}$ ; IRAM 11.8 mm; IRAM 2.36 mm; IRAM 4.00 mm; IRAM 4.75 mm; IRAM 8.0 mm; IRAM 13.2 mm; IRAM 16.0 mm; IRAM 19.0 mm; IRAM 26.5 mm; IRAM 31.5 mm; IRAM 37.5 mm; IRAM 53.0 mm e IRAM 63.0 mm.

a.1.2 Recipiente de tela de alambre: que permitan el libre acceso de la solución hacia la muestra y la salida del líquido sin que se produzca arrastre de material. Para tal fin, puede usarse canastos de tela de alambre con igual tamaño de abertura que los tamices utilizados para determinar la pérdida de la fracción ensayada.

a.1.3 Balanza: Para pesar el agregado fino, con una capacidad de 500 gr, y que asegure el 0.1 gr de precisión.

a.1.4 Balanza: Para pesar el agregado grueso, con una capacidad de 5000 gr y asegure una precisión del 0.5 gr.

a.1.5 Estufa: capaz de mantener, con las puertas cerradas, una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y un grado de evaporación, a esta temperatura, de 25 g/h durante 4 h.

a.1.5.1 El grado de evaporación se determina por la pérdida de agua en vasos de Griffin de 1 dm<sup>3</sup> que se cargan con 500 gr de agua a  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y se colocan en las esquinas y en el centro de cada estante de la estufa. Los requerimientos de evaporación se aplican a todas las situaciones de ensayo cuando la estufa solo contiene los vasos con agua.

a.1.6 Regulador de temperatura. Se dispondrá de un dispositivo adecuado para regular la temperatura de las muestras durante la inmersión en la solución de sulfato de sodio.

a.1.7 Densímetros: que permitan determinar la densidad de la solución asegurando el 0.001.

b) Reactivos:

b.1 Agua para análisis (IRAM 21 322)

b.2 Solución saturada de sulfato de sodio (IRAM 21 365)

b.2.1 Se prepara la solución disolviendo en agua 350 gr del sulfato de sodio anhidro (IRAM 21 365) o 750 gr de sulfato de sodio decahidratado (p.a) y diluyendo hasta 1 dm<sup>3</sup>, a una temperatura entre  $25^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$ . Se agrieta la mezcla durante la adición de la sal y la solución a intervalos frecuentes antes de su uso.

b.2.2 Se enfría la solución a  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y se mantiene esa temperatura por lo menos durante 48 hs antes de su empleo.

b.2.3 Previo a cada uso se agrieta y se determina la densidad relativa la que debe estar comprendida entre 1.151 y 1.174.

b.2.4 Si la solución no fuese límpida se la descarta o bien se la filtra y se determina su densidad relativa.

c) Muestras:

c.1 Agregado fino: El ensayo se realiza con el material que pasa el tamiz IRAM 9.5 mm. La cantidad de muestra será tal que produzca, por tamizado, como mínimo 100 gr de cada una de las fracciones indicadas en la tabla 8

Tabla 8: Agregado fino

Fracciones	Pasa por tamiz IRAM	Retenido en el tamiz IRAM
1	600 $\mu$ m	300 $\mu$ m
2	1,18 mm	600 $\mu$ m
3	2,36 mm	1,18 mm
4	4,75 mm	2,36 mm
5	9,5 mm	4,75 mm

c.2 Agregado grueso: El ensayo se realiza con el material retenido en el tamiz IRAM 4.75 mm. La cantidad de muestra será tal que produzca, por tamizado, como mínimo las cantidades que se indican para cada fracción en la tabla 9

Tabla 9: Agregado grueso

Fracción	Pasa por tamiz IRAM	Retenido en el tamiz IRAM	Masa (g)	
			Parcial	Total
1	9,5 mm	4,75 mm	---	300 $\pm$ 5
2	19 mm	9,5 mm	---	1000 $\pm$ 10
	13,2 mm	9,5 mm	330 $\pm$ 5	---
	19 mm	13,2 mm	670 $\pm$ 10	---
3	37,5 mm	19 mm	---	1500 $\pm$ 50
	26,5 mm	19 mm	500 $\pm$ 30	---
	37,5 mm	26,5 mm	1000 $\pm$ 50	---
4	63 mm	37,5 mm	---	5000 $\pm$ 300
	53 mm	37,5 mm	2000 $\pm$ 200	---
	63 mm	53 mm	3000 $\pm$ 300	---

Los tamaños mayores en 25 mm se expresan según el tamiz IRAM correspondiente y se pesan 7000 g  $\pm$  1000 g de cada una de las fracciones.

c.3 Agregado fino y grueso: Cuando un agregado por ensayar contenga proporciones apreciables tanto de material fino como de grueso, siendo de más del 10% el material más grueso que 9.5 mm y de más del 10% el material fino que 4.75 mm, se separan muestras del material más fino que 4.75mm y del

material más grueso que 4.75 mm de acuerdo con los procedimientos para agregados finos y gruesos respectivamente. Se informa separadamente los resultados de la fracción de tamaño más fino y más grueso en el tamizado inicial.

#### c.4 Preparación de las muestras.

##### c.4.1 Agregado Fino.

- i. Se lava la muestra sobre tamiz IRAM 300  $\mu\text{m}$ , se seca hasta masa constante a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y se separa por tamizado en los distintos tamaños de acuerdo con los pasos siguientes:
- ii. Se realiza una separación grosera de la muestra utilizando la serie de tamices IRAM indicados en 3.1.
- iii. De las fracciones obtenidas en esta forma se toman muestras en cantidad suficiente como para obtener, al efectuar el tamizado definitivo, una masa de 100 g de cada una de las fracciones indicadas en la tabla 1. Generalmente son suficientes 110 g de muestra de cada fracción y de no obtener la cantidad necesaria se repite el procedimiento indicado en 4.1.2.
- iv. Al preparar las muestras no debe utilizarse el agregado fino retenido en las mallas de los tamices.
- v. Se pesan  $100 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$  de cada una de las fracciones obtenidas por tamizado y se colocan en recipientes separados, para su ensayo.

##### c.5 Agregado Grueso.

- vi. Se lava y se seca la muestra hasta masa constante a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y se separa, por tamizado, en los distintos tamaños, según se indica en 3.1.
- vii. Se pesan cantidades de los diferentes tamaños dentro de las tolerancias establecidas en 3.2 y cuando la porción de ensayo conste de dos tamaños, se los mezcla para obtener la masa total.
- viii. Se registran las masas de las muestras de ensayo y de las fracciones que las componen.
- ix. Para tamaño mayores que 19 mm, se registran el número de partículas de cada muestra de ensayo.

#### d) Procedimiento

##### d.1 Inmersión de las muestras.

- i. Se sumerge el recipiente con la muestra en la solución de sulfato de sodio durante  $17 \text{ hs} \pm 1 \text{ hs}$ , cuidando que quede cubierta por una capa de líquido durante ese lapso a una temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y cubierto los recipientes con el objeto de evitar una evaporación excesiva y el acceso de sustancias extrañas.
- ii. Cuando se trabaja con materiales muy livianos puede ser necesario colocar telas de alambre de cierto peso sobre las muestras para que queden cubiertas por la solución.

##### d.2 Secado de las muestras.

- iii. Luego del periodo de inmersión, se retira de la solución el recipiente con la muestra, se escurre el líquido durante  $15 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$  y se lo coloca en la estufa a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se seca la muestra a la temperatura especificada hasta constancia de masa.
- iv. Se establece el tiempo requerido para alcanzar la constancia de masa de la forma siguiente:
- v. Con la estufa cargada con la carga máxima de muestra esperada se determinan las pérdidas de masa de las muestras de ensayo retirándolas y pesándolas sin enfriar a intervalos de 2 hs a 4 hs.
- vi. Se realizan suficientes ensayos para establecer el tiempo de secado para la situación menos favorable en la estufa (ver 1.1.5) y la condición de la muestra. Se considera que se ha obtenido masa constante cuando la pérdida de masa es menor que  $0.1 \text{ g}/100 \text{ gr}$  en 4 hs secado.
- vii. El tiempo de secado requerido para alcanzar masa constante puede variar considerablemente por varios motivos. La diferencia del secado será reducida a medida que se acumulen ciclos, debido a la sal que se adhiere a las partículas y, en algunos casos, a causa del aumento del área superficial debido a rotura. Las diferentes fracciones del agregado, tendrán diferentes velocidades de secado. Los tamaños más pequeños se secan más lentamente debido a su mayor área superficial y menores espacios

interparticulares, pero esto puede modificarse por efectos del tamaño y forma del recipiente.

e. Numero de Ciclos.

- i. Se repite el proceso alternativo de inmersión y secado hasta obtener el número de ciclos establecido en las normas IRAM 1512 o IRAM 1531, según corresponda.
- ii. Cuando deba interrumpirse el ensayo, esto se efectúa luego de cumplido un ciclo completo, debiéndose dejar el material ensayado al aire a temperatura ambiente hasta reanudar y completar los ciclos correspondientes. Se considera un ciclo completo a la inmersión y posterior secado de la muestra de ensayo.

f. Determinación cuantitativa.

- i. Terminado el ciclo final y una vez enfriada la muestra, se lava eliminando totalmente el sulfato de sodio, lo que se comprueba por reacción del agua de lavado con cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ). El lavado se efectúa mediante un chorro suave de agua a  $43^\circ\text{C} \pm 6^\circ\text{C}$  sobre las muestras contenidas en recipientes de tela de alambre de igual tamaño de abertura que los tamices utilizados para determinar la pérdida de la fracción analizada.
- ii. Esto puede realizarse colocándolas en un tanque en el cual se introduce agua caliente en la parte inferior y se deja que rebalse. En la operación de lavado, las muestras no deben estar sujetas a impactos o abrasión que pueda deteriorar las partículas.
- iii. Luego de eliminado el sulfato de sodio se seca cada fracción de la muestra a  $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .

5.4.2.1 Se tamiza el agregado fino sobre el mismo tamiz en que fue retenido anteriormente. El método y duración del tamizado debe ser el mismo que el utilizado al preparar las muestras para ensayo.

5.4.2.2 Se tamiza el agregado fino sobre el mismo tamiz indicado en la tabla 3, para el tamaño de partícula que corresponde. El tamizado debe ser manual con la agitación suficiente como para asegurar que pase únicamente en material de

tamaño menor que el de la abertura del tamiz. No se debe emplear ninguna manipulación adicional que pueda romper las partículas.

Tabla 10; Determinación cuantitativa del agregado grueso

Tamaño del agregado	Tamiz usado para determinar pérdida
63 mm a 37,5 mm	IRAM 31,5 mm
37,5 mm a 19 mm	IRAM 16 mm
19 mm a 9,5 mm	IRAM 8 mm
9,5 mm a 4,75mm	IRAM 4 mm

- iv. Se pesa el material retenido en cada tamiz y se registran las cantidades respectivas. La diferencia entre cada una de estas cantidades y la masa inicial de la fracción de la muestra ensayada es la pérdida en el ensayo y se expresa como porcentaje de la masa inicial indicada en la tabla 4.

g) Examen cualitativo:

Se realiza un examen cualitativo de las muestras retenidas por tamiz IRAM 19.0mm, como sigue:

- i. Se separan las partículas de cada muestra de ensayo en grupos, de acuerdo con el deterioro producido por el ensayo.
- ii. Se pueden producir muchos tipos de deterioros. En general, se clasifican como fisuración, desmenuzado, rotura, escamado, etc. Si bien para realizar el examen cualitativo se utilizan muestras con partículas, retenidas por tamiz IRAM 19.0 mm se recomienda efectuar el análisis de los tamaños más pequeños para determinar si existen evidencias de una excesiva fisuración.

[11]

Tabla 11: Planilla de informe sugerida

ENSAYO DE DURABILIDAD DEL AGREGADO FINO						
Fraccionamiento del material para ensayo	Granulometría de la muestra original (%)	Masa de las fracciones antes del ensayo (g)	Material que pasa por el tamiz IRAM correspondiente después del ensayo (%)	Masa promedio (pérdida) (%)		
Menor que 150 µm	5,0	---	---	---		
300 µm a 150 µm	11,4	---	---	---		
600 µm a 300 µm	26,0	100	4,2	1,09		
1,18 mm a 600 µm	25,2	100	4,8	1,21		
2,36 mm a 1,18 mm	17,0	100	8,0	1,36		
4,75 mm a 2,36 mm	10,8	100	11,2	1,21		
9,5 mm a 4,75 mm	4,6	---	11,2*	0,52		
Totales	100,0	---	---	5,39		
ENSAYO DE DURABILIDAD DEL AGREGADO GRUESO						
Tamices IRAM	Componentes fracciones de la muestra (g)	Fraccionamiento del material para ensayo	Granulometría de la muestra original (%)	Masa de las fracciones antes del ensayo (g)	Material que pasa por el tamiz IRAM correspondiente después del ensayo (%)	Masa promedio (pérdida) (%)
63 mm a 53 mm	2825	63 mm a 37,5 mm	20,0	4783	4,8	0,96
53 mm a 37,5 mm	1958					
37,5 mm a 26,5 mm	1012	37,5 mm a 19 mm	45,0	1525	8,0	3,60
26,5 mm a 19 mm	513					
19 mm a 13,2 mm	675	19 mm a 9,5 mm	23,0	1008	9,6	2,20
13,2 mm a 9,5 mm	333					
9,5 mm a 4,75 mm	298	9,5 mm a 4,75 mm	12,0	298	11,2	1,34
Totales	---	---	100,0 %	---	---	8,10

\* El porcentaje de pérdida (11,2 %) del tamaño próximo menor se considera como el porcentaje de pérdida para este tamado, si este tamaño contiene menos del 5 % de la muestra original recibida (ver 4.3).

## **2.4. MACADAM**

### **2.4.2. RESEÑA HISTÓRICA DEL MACADAM.**

John Loudon McAdam (1756-1836) nació el 21 de septiembre de 1756 en Ayr. Capital del condado histórico de Ayrshire, en Escocia. Miembro de la baja nobleza del condado, era el menor de los diez hijos del matrimonio entre James McAdam y Susanna Cochrane, sobrina del 7mo Conde de Dundonald.

John estudio en la McDoick'i School de Maybole hasta 1770. Fue en ese momento, cuando John tenía apenas 14 años, cuando el negocio de su padre (el Banco de Ayr) se fue a la bancarrota y James McAdam murió. La familia quedo arruinada. John fue enviado a vivir con su tío, William MacAdam, un rico mercader de las colonias que vivía con Nueva York. En esos años estallo la rebelión de las Trece Colonias contra Gran Bretaña (1775-1783), en la que John apoyo desde el primer momento la causa del Rey. John amaso una gran fortuna a una edad muy temprano durante esos años de la guerra, convirtiéndose en un mercader de éxitos como socio propietario del banco privado 'General Mathew' y agente valioso: vendía mercancías y material capturados a los rebeldes durante la guerra (a coste cero), reservado además una parte para él.

Durante los años que pasó en Nueva York, John se casó con Gloriana Nicoll. Sin embargo, en 1783 pagó el precio de haber apoyado la causa realista que acabó perdiendo la guerra: los nuevos patriotas norteamericanos incautaron la mayoría de su patrimonio y activos económicos antes de poner a John, su mujer y sus dos hijos en un barco de vuelta a Escocia. Aun así, de vuelta en Escocia, a John le quedaba aún dinero para comprar una finca en Sauchrie cerca de Maybole, y las convenientemente cultivadas relaciones con su pariente lejano, el 9º Conde de Dundonald, le permitieron adquirir intereses en los negocios de extracción del hierro y productos alquitranados derivados del carbón.

A partir de ese momento John dedicaría su vida a la construcción de carreteras. Su obsesión era abaratar los terribles costes de construcción de los adoquinados y mampuestos que se usaban entonces. En 1798 sus posiciones empezaron a ser conocidas y se le pidió ayuda para mejorar la superficie de rodadura de las carreteras en Falmouth. En 1815 fue nombrado inspector del Bristol Turnpike Trust (Patronato de Carreteras de Bristol), escribiendo en esa época sus dos principales obras sobre carreteras, *Practical Essay on the Scientific Repair and Preservation of Roads* (1819) y *Remarks on the Present System of Road-Making* (1821). John argumentaba que construir las carreteras en una plataforma elevada respecto a la superficie del terreno natural, asegurando un buen drenaje y empleando cuidadosamente diversas capas de piedra partida, recebadas con grava fina o escorias, aseguraba una durabilidad muy superior a las de las vías construidas hasta entonces, y a un coste muy inferior. Además, los costes de mantenimiento también eran mucho menores en estas nuevas carreteras respecto a las preexistentes. Este método constituye en sí mismo el mayor avance en la construcción de carreteras desde los romanos, y fue conocido como método McAdam, o castellanizado, MACADAM.

En la década de 1820 alrededor de 70 patronatos de carreteras contrataron a John como consultor. En 1823 el Parlamento de Gran Bretaña realizó un estudio sobre el estado de las carreteras del país, que se percibía como obsoleto e insuficiente para las necesidades de una nación en rápida industrialización. La principal consecuencia del estudio fue el nombramiento de John Loudon McAdam como Inspector General de Carreteras Metropolitanas de Gran Bretaña (*Surveyor General of Metropolitan Roads across Great Britain*). En consecuencia y con el nuevo poder adquirido, su método de construcción de carreteras se estandarizó y se extendió a todo el país, pasando posteriormente a Norteamérica y al resto de Europa. [12]

Ilustración 28: Máquina para elaboración de Macadam (1908)



Ilustración 29: Ejecución de macadam en Turnpike Road, Maryland - 1823 (Carl Rakeman)



En las estructuras de firme de MacAdam se incluía un drenaje la explanada, por lo que tendría siempre un bombeo que permitiese la evacuación del agua. Las capas deberían ser de piedra partida para tener una buena angularidad. Un

firme tipo tenía un espesor de unos 25 cm, con dos primeras capas con un tamaño máximo de 75 mm y una última de rodadura de 5 cm con tamaños máximo de 25 mm. La razón de utilizar el tamaño de árido máximo de 25 milímetros (1 pulgada) era proporcionar un pavimento liso para las ruedas del carro. La compactación de las capas se llevaba a cabo con cilindros remolcados por caballería o, una vez disponibles, por compactadores autopropulsados, inicialmente a vapor (steam roller) y luego con motores de expulsión.

Con la progresiva mecanización desaparecieron los picapedreros y la obtención in situ de la piedra de las capas de firme, transportándose el material ya elaborado desde las instalaciones de machaqueo en las canteras. En la ilustración 31, se muestra un tren de dúmperes remolcados por un tractor de vapor.

*Ilustración 30: Construcción de la capa base, Operarios, con gafas y martillos para acabar de reducir los tamaños*



*Ilustración 31: El transporte de macadam desde el machacador en cantera en 1910*



### **2.4.3. TIPOS DE MACADAM.**

#### **Macadam bituminoso.**

Se define como macadam bituminoso por penetración con un ligante viscoso sobre una capa compactada de árido grueso, de granulometría uniforme. El ligante se introduce entre el árido por gravedad: el tratamiento se termina mediante la extensión y compactación de una capa de árido fino.

Su ejecución incluye las operaciones siguientes:

- Preparación de la superficie existente.
- Extensión y compactación del árido grueso.
- Aplicación del ligante bituminoso
- Extensión y compactación del árido fino.

#### **Materiales:**

##### **2.4.3.1. Ligante bituminoso:**

##### **2.4.3.2. Macadam hidráulico.**

###### **a.) Definición.**

El Macadam hidráulico, es una capa de pavimento que consiste en una o más capas de agregados gruesos con diámetro variable de 3 1/2 in a 1/2 in,

compactada con las partículas de relleno fuertemente entrelazadas, con la ayuda de lubricante de agua. [2]

### **b.) Materiales.**

Los materiales constitutivos de la capa de macadam hidráulico son agregados minerales (agregado grueso, agregado fino o material de relleno, capa aisladora).

b.1.) Agregado grueso: La piedra para este trabajo consistirá en partículas limpias, tenaces y durables y estará exenta de fragmentos laminares, alargados o conchoidales, material blando o alterado y sustancias nocivas o impurezas y deberá satisfacer los siguientes requisitos:

b.1.1.) Distribución granulométrica: La primera capa deberá satisfacer la graduación A de la tabla, y la segunda capa deberá satisfacer la graduación C de la tabla estabilizadas previamente mediante la utilización de palas cargadoras. En cada capa el tamaño máximo de la piedra no deberá ser superior a  $2/3$  del espesor de la misma acabada.

b.1.2.) Porcentaje de abrasión de los Ángeles: (Ensayo de la AASHTO T 96) inferior a 40%.

b.1.3.) Porcentaje de fragmentos laminares: (En conformidad con el ensayo British Standard Shape Test for Aggregates) Inferior al 10%.

b.1.4.) Durabilidad: Después de los cinco ciclos del ensayo AASHTO T 104 el agregado no deberá sufrir una pérdida de peso superior al 12%.

b.1.5.) Sustancias deletéreas: Los porcentajes máximos en peso no deberá exceder los siguientes valores:

- Materiales que pasa el tamiz N: 200	1%
- Terrones de arcilla	¼%
- Fragmentos blandos	3%
- Si el material que pasa el tamiz N:200 consiste en polvo de fractura, exento de arcilla el porcentaje respectivo podrá ser aumentado a	1.5%

b.2.) Agregado fino o material de relleno: El material de relleno consistirá en recebo de piedra o arena de yacimiento natural. Las partículas deberán ser no plásticas, limpias, tenaces y durables, exentas de tierra u otros materiales nocivos, y deberán satisfacer los requisitos de graduación contenidos en la tabla. La pérdida de peso después de los cinco ciclos del ensayo AASTHO T 104 no deberá ser menor que 25%.

Tabla 12: Rangos de granulometría y tolerancias [2]

Tamices		PORCENTAJE QUE PASA				
		AGREGADO GRUESO				
Pulg.	Mm	A	B	C	D	AG FINO (RELLENO)
4	101.6	100	-	-	-	-
3 ½	88.9	90-100	-	-	-	-
3	76.2	-	100	-	100	-
2 ½	63.5	25-60	90-100	100	90-100	-
2	50.8	-	35-70	90-100	-	-
1 ½	38.1	0-15	0-15	35-75	25-80	-
1	25.4	-	-	0-15	-	-
¾	19.1	0-5	0-5	-	0-10	-
½	12.7	-	-	0-5	-	-
3/8	9.52	-	-	0-5	-	100
N:4	4.75	-	-	-	-	85-100
N:100	0.15	-	-	-	-	10-30

b.3.) Capa aisladora: El agregado fino o arena a ser colocado sobre la subrasante o subbase, para construir una capa de separación una capa de separación, cuando sea requerido, deberá satisfacer los requisitos indicados para el material de relleno. También se puede se podrá usar para capa aisladora piedra, así como sale de la trituradora, de graduación en que el cien por ciento (100%) pase por la criba de malla cuadrada de una pulgada.

En cualquier caso, ese material no deberá contener más que el cinco por ciento (5%) de partículas que pasen el tamiz N:200.

## **2.5. MODULO RESILIENTE**

En la medida que las innovaciones tecnológicas se han ido aplicando en los diferentes campos de la ingeniería ha sido posible desarrollar metodologías más rápidas y eficaces para la determinación de parámetros de diseño; un avance que no ha sido ajeno a la ingeniería vial, donde ha sido posible llegar a reemplazar la ejecución de ensayos destructivos por la implementación de pruebas no destructivas que permiten determinar la condición estructural de un pavimento, a partir, de la medición de deflexiones superficiales producidas por la aplicación de una carga externa.

Términos como módulo resiliente, módulo dinámico y módulo elástico suelen emplearse imparcialmente para referirse a las propiedades de cualquiera de las capas que conforman la estructura de un pavimento; debiendo resaltar que el término de módulo resiliente está asociado a la subrasante y a las capas granulares, mientras que el módulo dinámico se usa principalmente para referirse a la carpeta asfáltica.

Uno de los equipos que ha tomado fuerza dentro de los estudios de capacidad estructural sobre pavimentos flexibles es el deflectómetro de impacto, un dispositivo que permite medir las deflexiones de un pavimento en forma rápida, eficiente y confiable. Estos datos son utilizados en metodologías de cálculo inverso o retrocálculo, para estimar y analizar diversos parámetros estructurales, tales como los módulos de las capas que conforman un pavimento, el número estructural que representa la resistencia total de toda la estructura o la vida residual o remanente de la misma, entre otros. [13]

Cuando un vehículo circula sobre el pavimento sus ruedas transmiten cargas al interior de la estructura y el suelo de fundación, dicha carga genera un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se consideran relacionado entre si a través del Módulo de elasticidad y la razón de Poisson propios del material. Sin embargo, la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos y suelos de fundación muestra que, bajo pulsos de carga dinámicos como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de materiales no presenta un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de Módulo Resiliente, que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables. [1].

## **2.5.1. DEFLECTOMETRO DE IMPACTO**

### **2.5.1.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO**

El Deflectómetro de impacto tipo Falling Weight Deflectometer (FWD), es un método de ensayo no destructivo, que aplica en la superficie del pavimento una carga dinámica en forma de impulso similar, tanto en duración como en magnitud a la producida por los vehículos que la circulan, a continuación, se presenta características importantes a saber sobre el equipo.

Ilustración 32: Deflectómetro de Impacto FWD

FUENTE: Elaboración propia



*Ilustración 33: Vista del Equipo computacional con los resultados de la medición*

*Fuente: Elaboración propia*



La primera de ellas es el sistema de aplicación de carga, la cual se genera a través de un pulso producido por dejar caer un determinado peso sobre la superficie del pavimento, simulando en forma bastante aproximada el efecto de un vehículo circulando sobre él a 60 o 70 Km/h.

El FWD no sólo mide la deflexión del pavimento bajo el área de aplicación de la carga, sino que lo hace en una serie de 7 a 9 puntos localizados a distancias que varían entre 20 y 180 cm del centro del impacto por medio de geófonos. Como complemento a los dispositivos de medición de carga y deflexiones, el deflectómetro cuenta con un par de sensores de temperatura, los cuales captan la temperatura del ambiente y superficial del pavimento al momento de la ejecución de la prueba.

Conocer la temperatura del pavimento al momento del ensayo es muy importante, debido a que el asfalto a bajas temperaturas posee un

comportamiento resistente pero frágil, opuesto al que se presenta a altas temperaturas, en donde se comporta de forma débil y dúctil; razón por la cual, la rigidez del pavimento debe ser corregida por efectos de temperatura. [13]

El equipo para las mediciones está montado sobre un remolque tirado por un vehículo que le permite un movimiento ágil y adecuado para liberar el área de manera inmediata.

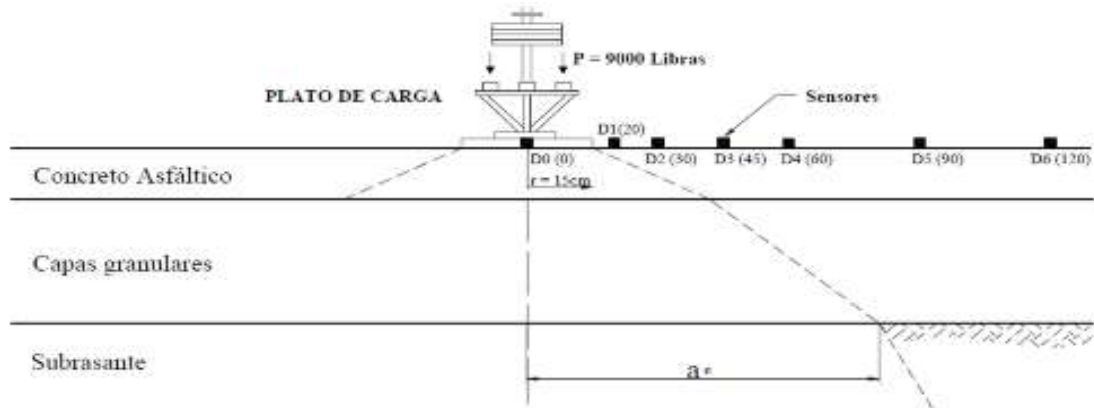
Las mediciones se realizan en ambos carriles (ascendente y descendente) aproximadamente a 90cm del borde extremo de cada carril, de manera que coincidan con la huella externa. [14]

La placa de carga es un disco metálico partido por la mitad, tiene un diámetro de 300 mm (para pavimentos en carreteras) y 450 mm (para pavimentos en aeropuertos), una propiedad importante es que debe permitir la medición de la deflexión al centro de la placa, garantiza una distribución uniforme de la carga sobre la superficie, la carga y el radio del plato de carga son tales que permiten obtener sobre el pavimento condiciones de solicitaciones similares a las producidas por la presión de los vehículos.

El equipo utiliza los sensores basados en LVDT, denominados sismómetros encargados de tomar las mediciones de deflexión de hasta 5mm, el número de sensores y su espaciamento son a discreción del profesional encargado de la evaluación, pero hay algunas instituciones como el AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el SHRP (Strategic Highway Research Program) que nos recomiendan ciertas combinaciones. [14]

La ilustración siguiente muestra el concepto de medición mediante deflectómetro de Impacto:

Ilustración 34: Concepto de mediciones con Deflectómetro de Impacto



### 2.5.1.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DEFLECTOMETRO DE IMPACTO

#### Ventajas:

- Es un ensayo no destructivo.
- El efecto de la aplicación de la carga se asemeja bastante al efecto del vehículo en movimiento.
- Puede ser manejado por una sola persona.
- Toma gran cantidad de datos en forma rápida y precisa (hasta 60 ensayos/horas)
- Diseñado para múltiples propósitos en la ingeniería de pavimentos, desde pavimentos con carpetas asfálticas hasta aeropuertos.
- Puede repetirse el ensayo,
- Menor interrupción al tránsito.
- Ideal para sistemas mecanísticos y analíticos de diseño.
- Se obtiene resultados de forma continua.
- 

#### Desventajas:

- Alto costo inicial del equipo.
- Requiere una capacitación tanto en operación, interpretación y posterior diseño.

Se puede observar que las ventajas superan ampliamente las desventajas, posee pocas desventajas, esta es la razón por la cual el deflectómetro de impacto tiene una gran aceptación a nivel mundial

## **2.5.2. EVALUACION DE DEFLEXIONES. METODO AASHTO**

### **2.5.2.1. NORMALIZACION DE LAS DEFLEXIONES**

A la hora de realizar el análisis del comportamiento estructural de un tramo vial, se llevan a cabo normalizaciones de las deflexiones para cargas estándar de 9000 lbs (4082.3kg) según lo recomendado por la AASHTO. [14]

### **2.5.2.2. SECCIONES HOMOGENEAS**

Una vez dispuesto y obtenidos los estudios geotécnicos, los resultados de los ensayos deflectométricos y los respectivos datos de tránsito, corresponde determinar y definir las unidades homogéneas de análisis mediante la utilización de la metodología AASHTO (AASHTO Guide For Design of Pavement Structures – 1993) Apéndice J Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences (método de las diferencias acumuladas), debiendo cumplirse los siguientes requisitos:

1. No se supera el 30 % de coeficiente de variación de  $D_{0c}$  (VARIACION PROMEDIO: AASHTO-93, Tabla 3.6, Pagina III-53).
2. Variación del tráfico no superior al 20%. Todas las secciones están sometidas al mismo tráfico.
3. Longitud no menor a 600 metros. [14]

### **2.5.2.3. RETROCALCULO**

Mediante la técnica del retroanálisis, es posible determinar los módulos de cada una de las capas que conforman la estructura. Aplicando el modelo AASHTO,

para estructuras flexibles, entrega también el número estructural efectivo del pavimento existente y el Módulo Resiliente del suelo de fundación para cada tramo homogéneo. [15]

A continuación, se indica la metodología y las expresiones seguidas para la obtención de los parámetros estructurales:

**Módulo Resiliente (Mr):** A distancias suficientemente grandes del plato de carga, la deflexión medida en la superficie del pavimento responde solamente a la deformación de la subrasante. Esto permite retrocalcular el módulo resiliente de la subrasante a partir de valores de una deflexión y la magnitud de la carga aplicada, a partir de la siguiente expresión:

$$Mr = \frac{0.24 * P}{dr * r}$$

Donde:

- M<sub>R</sub>** : Módulo resiliente de la subrasante (psi)
- P**: es la magnitud de la carga aplicada (libras)
- d<sub>r</sub>**: es la deflexión medida a una distancia r del centro de aplicación de la carga (pulgadas).
- r** : es la distancia al centro de aplicación de la carga (pulgadas) [16]

Para el uso de la ecuación anterior se debe considerar las siguientes condiciones.

- 1- En primer lugar, la deflexión debe ser medida a una distancia suficientemente alejada del plato de carga como para que esta deflexión se deba solo a la deformación en el punto que se quiera analizar.

2- Por otro lado, y en sentido contrario, la distancia no debería de ser muy grande ya que las deflexiones podrían ser muy pequeñas y por lo tanto muy difíciles de medir con la exactitud necesaria.

La distancia mínima a utilizar debe cumplir con la siguiente condición:

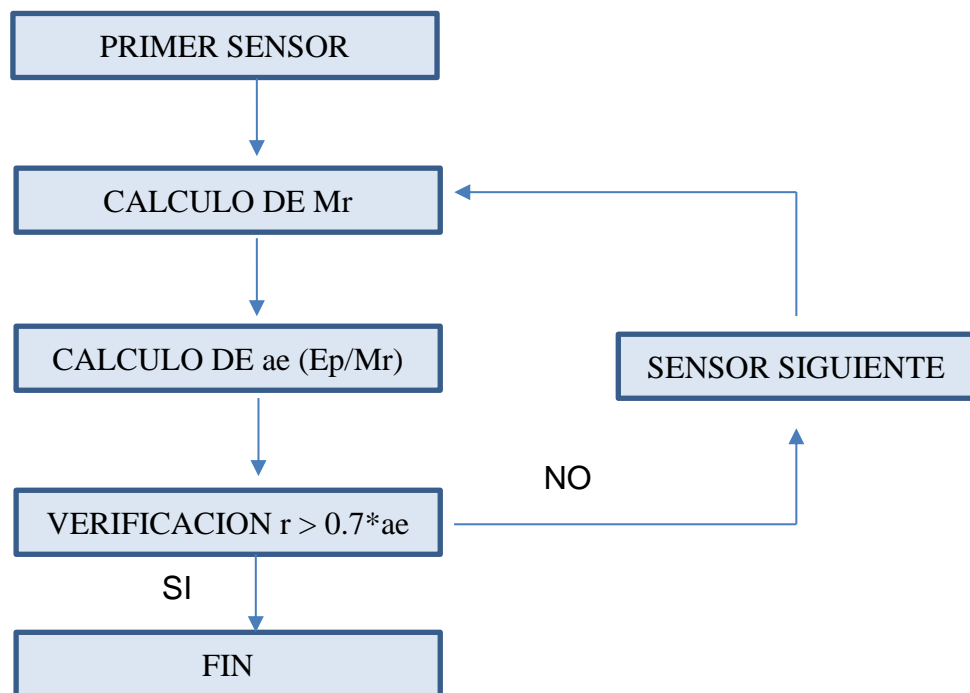
$$r \geq 0.7 * a_e$$

Donde:

$$a_e = \sqrt{a + \left( D * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

- a<sub>e</sub>** es el radio del bulbo de tensiones en la interface subrasante – pavimento.
- a** es el radio del plato de cargas del equipo FWD
- D** es el espesor total de las capas de pavimento sobre la subrasante
- E<sub>p</sub>** es el módulo efectivo de todas las capas del pavimento [17]

A continuación, se presenta un esquema a fin de facilitar el entendimiento del proceso de cálculo del Módulo Resiliente:



Antes de utilizar el  $M_R$  retrocalculado en el diseño del pavimento, debe ser ajustado para ser consistente con el valor medido en laboratorio usado por la ecuación AASHTO de pavimentos flexibles. El valor de  $M_R$  retrocalculado debe ser multiplicado por un factor de corrección  $C$ , el cual varía en función del tipo de suelo de subrasante y la presencia de una capa rígida.

$$M_{R(Diseño)} = C * M_R$$

Donde:

$M_R$  Modulo resiliente de la subrasante obtenida por retrocálculo (psi)

$C$  Factor de ajuste o corrección

$M_{R(Diseño)}$  corresponde entonces al valor de  $M_R$  corregido mediante factor en cuestión. [16]

Normalmente se adopta un  $C=0.33$  siguiendo criterios desarrollados en la metodología AASHTO 93.

**Modulo efectivo del pavimento ( $E_p$ ):** conocidos el espesor del pavimento ( $D$ ) y el módulo resiliente de la subrasante ( $M_R$ ), el módulo efectivo del pavimento se determina a partir de la deflexión medida en el centro de aplicación de la carga usando la siguiente expresión:

$$d_o = (1.5 * p * a) * \left\{ \frac{1}{M_R * \sqrt{a + \left( \frac{D}{a} * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

Donde:

$d_o$  es la deflexión medida en el centro de aplicación de la carga, ajustada a una temperatura estándar de 68°F (20°C)

$p$  es la presión aplicada por el plato de carga.

$a$  es el radio del plato de cargas del equipo FWD.

**D** es el espesor total de las capas de pavimento sobre la subrasante.

**E<sub>p</sub>** es el módulo efectivo de todas las capas del pavimento.

**M<sub>R</sub>** Módulo resiliente de la subrasante obtenida por retrocálculo.

Como se observa, el proceso de cálculo del  $M_R$  y  $E_p$  es iterativo, dado que el valor de  $E_p$  tiene influencia en la determinación del sensor utilizado para el cálculo de  $M_R$ , y a su vez este valor influye en la determinación del  $E_p$ .

**Numero estructural efectivo ( $SN_{ef}$ ):** Se determina a partir de la siguiente expresión:

$$SN_{ef} = 0.0045 * D * \sqrt[3]{E_p}$$

Donde:

**D** es el espesor de las capas de pavimento.

**E<sub>p</sub>** es el módulo efectivo retrocalculado.

**Radio de curvatura ( $R_c$ ):** el radio de curvatura expresado en metros se determina a partir de la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{6250}{2 * \left( \frac{d_0}{10} - \frac{d_{20} + d_{30}}{20} \right)}$$

Donde  $d_0$ ,  $d_{20}$  y  $d_{30}$  son las deflexiones medidas a 0, 20 y 30 cm respectivamente del punto de aplicación de la carga, corregidas a la carga y temperatura estándar.

### 2.5.3. EVALUACION ESTRUCTURAL. METODO MECANICISTA

#### 2.5.3.1. RETROCALCULO DE MODULOS POR CAPAS

Los datos obtenidos de la deflectometría FWD se procesan por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo, que permite determinar el módulo elástico de cada capa del pavimento y de la subrasante.

El procedimiento de análisis se lleva a cabo por medio de la suposición de los valores de módulo elástico por capas, realizando el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias del punto de aplicación, bajo un medio teórico propio del método.

El método mecanicista se basa en el método de ajustes del cuenco de deflexiones que calculan las deflexiones teóricas y las comparan con las deflexiones producidas por el FWD, ajustando por iteración los valores de los módulos, hasta obtener una diferencia adecuada entre las deflexiones calculadas teóricamente y las deflexiones reales medidas en terreno.

El retrocálculo permite el ajuste de los módulos y/o ecuaciones constitutivas de las distintas capas de una estructura vial en base a la medición de deformaciones en superficie o mediante características de los materiales. Conociendo los espesores de cada una de las capas el programa nos permite calcular los módulos de cada uno de ellas. [14]

Para calcular las deflexiones a diferentes profundidades y distancias se utiliza la ecuación de Boussinesq que es la siguiente:

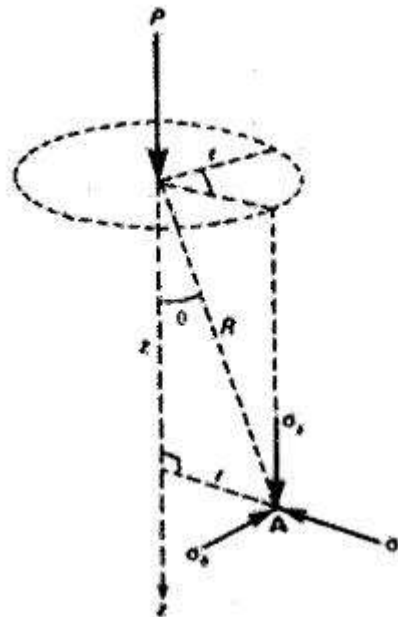
$$w = \frac{(1 + \mu) * P}{2\pi * a^2 * Mr} * \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{(1 + 2 * \mu)}{a} * [((a^2 + z^2)^{0.5} - z)] \right\}$$

Un parámetro importante para conocer el comportamiento estructural del paquete de firmes es el módulo de superficie que es explicada a continuación;

Módulo de superficie:

El método de la superficie da una apreciación rápida de cómo se comporta el paquete estructural, mediante la gráfica de los módulos con respecto a las distancias de los diferentes geófonos su puede saber la linealidad o no de los materiales.

Para exponer el concepto de módulo de superficie y sus aplicaciones es necesario utilizar la ecuación de Boussinesq para el siguiente caso:



La ecuación de la deflexión en el punto A está dada por:

$$\delta_z = \frac{(1 + \mu) * P}{2\pi * R * E} * \left( 2 * (1 - \mu) + \frac{z^2}{R^2} \right)$$

De donde fácilmente puede deducirse para un punto situado en la misma superficie del semi espacio ( $z = 0$  y  $R = r$ ) se tiene que:

$$\delta_r = \frac{(1 + \mu^2) * P}{\pi * r * E}$$

Por otro lado, ya conocemos la deflexión bajo el centro de la placa, la cual puede escribirse de la siguiente manera:

$$\delta_0 = \frac{(1 + \mu^2) * 2 * P}{\pi * a * E}$$

Por otro lado, para los puntos situados a una distancia superior al diámetro de la superficie circular ( $r > 2*a$ ), una carga puntual produce casi el mismo efecto que una carga de igual magnitud, pero distribuida uniformemente sobre una superficie circular. Por tanto, para dichos puntos puede emplearse la ecuación correspondiente a cargas puntuales, incluso cuando la carga sea de tipo uniforme circular.

Así, despejando los valores de E respecto a las deflexiones, obtenemos:

$$E_0 = \frac{(1 + \mu^2) * 2 * P}{\pi * a * \delta_0}$$

$$E_r = \frac{(1 + \mu^2) * P}{\pi * r * \delta_r}$$

Donde:

$\delta_z$  : Deflexión a una profundidad z en el punto A

$\delta_r$  : Deflexión superficial a una distancia r del eje de la carga

$\delta_0$  : Deflexión superficial en el eje de la carga

P : Carga del ensayo

$\mu$  : Modulo de Poisson

a : Radio del plato de carga

$E_0$  y  $E_r$  : Modulo equivalente de superficie

z : Profundidad para el cual se esta calculando las deformaciones

r : Distancia radial al eje de la carga.

El modulo equivalente de superficie (a una determinada distancia r) representa el modulo medio ponderado del conjunto de las capas del pavimento situadas por debajo de cierta profundidad que esta relacionada con la propia distancia r. Con los valores obtenidos mas arriba se puede bosquejar gráficos de módulos de superficie los cuales son muy informativos ya que con ellos podemos obtener una primera apreciación de las características del pavimento; estos muestran el nivel de dificultad que habrá en la evaluación de los datos, muestran si la subrasante es lineal o no lineal, muestra si hay una capa rígida (roca), entre otros.

Ajuste del cuenco de deflexión:

La metodología comienza con un conjunto de módulos estimados (valores semilla) para la estructura de pavimento. El cuenco de deflexión teórico de esta estructura de pavimento se calcula con la ecuación general de Boussineq. A continuación, se evalúa el error entre las deflexiones medidos y calculados. Los módulos en la estructura se incrementan o disminuyen en una pequeña

cantidad (típico 10%) y si el error en cualquiera de estos cuencos es menor que el cuenco original, esto se toma para ser una mejor solución.

El objetivo principal de esta opción es minimizar el error en cuanto al valor de campo y el valor calculado.

Definimos entonces el error en términos absolutos:

$$E = w^m_i - w^c_i$$

Donde:

$E$  : error absoluto de la medición.

$w^m_i$ : deflexión medida en campo del sensor  $i$ .

$w^c_i$ : deflexión calculada en campo del sensor  $i$ .

Como se requiere en términos relativos, para así comparar entre las diferentes mediciones, se tiene

$$E = \left( \frac{w^m_i - w^c_i}{w^m_i} \right)$$

Pero sumando los errores, los valores positivos se pueden cancelar con los negativos, resultando un valor no real, por lo tanto, se lo eleva al cuadrado:

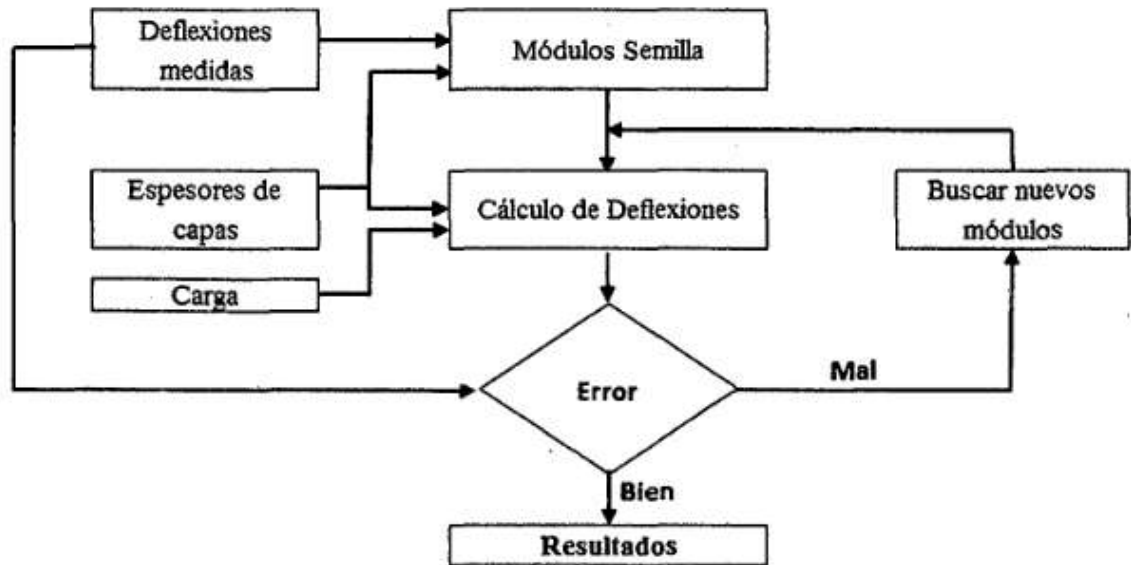
$$E^2 = \left( \frac{w^m_i - w^c_i}{w^m_i} \right)^2$$

Las deflexiones calculadas son comparadas con las deflexiones medidas hasta obtener un valor de RMS aceptable la cual se define con la siguiente ecuación.

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left( \frac{w^c_i - w^m_i}{w^m_i} \right)^2}$$

Es una medida estadística del ajuste que se obtiene al comparar las curvas de deflexión medida en campo por medio del FWD y la deflexión calculada durante el análisis. Errores con valores cercanos a cero indican que existe un muy buen ajuste entre las curvas comparadas, por lo que consecuentemente habrá una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos. Sin embargo, la teoría y la experiencia indican que es relativamente difícil conseguir un RMS igual a cero, por lo cual un valor menor al 15% indica que los resultados son satisfactorios.

Ilustración 35: Esquema grafico del proceso del retrocálculo mecanicista



## 2.6. VERIFICACION DEL DISEÑO ESTRUCTURAL POR METODO AASHTO 93.

El método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos flexibles, se basa primordialmente en identificar un número estructural (SN) para el pavimento, que puede soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural, el método se apoya en una ecuación que relaciona los coeficientes, con sus respectivos números estructurales, los cuales se calculan con ayuda de un software, el cual requiere unos datos de entrada como son el número de ejes equivalentes, el rango de serviciabilidad, la confiabilidad y el módulo resiliente de la capa a analizar. [18]

### Transito:

El establecimiento de los espesores mediante este método, se fundamenta en la determinación de las cargas equivalentes acumuladas para el periodo de diseño.

Se debe hacer un estudio detallado de tránsito que contenga la composición vehicular, tránsito medio anual, el factor camión, el tránsito acumulado en números de ejes.

### **Serviciabilidad:**

Es la condición necesaria de un pavimento para proveer los usuarios un manejo seguro y confortable en un determinado momento. [18]

Tabla 13: Índice de serviciabilidad en función de la calidad de la vía

Fuente: AASHTO 1993

<b>Índice de serviciabilidad (<math>p</math>)</b>	<b>Calificación</b>
0 – 1	Muy mala
1 – 2	Mala
2 – 3	Regular
3 – 4	Buena
4 – 5	Muy buena

### **Índice de servicio inicial:**

Es el valor de servicio de un pavimento recién construido o rehabilitado, los valores usuales son 4.2 para pavimentos flexibles y 4.5 para pavimento rígido

### **Índice de servicio final:**

Es el valor mínimo del índice de servicio que puede ser aceptado para un pavimento dado los valores usuales están entre 1.5 para vías de muy baja importancia y de 2.5 a 3.0 para vías arterias.

### **Índice de servicio final:**

Los valores anteriormente descritos nos permiten determinar la disminución del índice de servicio, que representa una pérdida gradual de la calidad de servicio de la carretera, originada por el deterioro del pavimento. Por tanto: [18]

$$\Delta PSI = p_o - p_t^{10}$$

Donde:

$PSI$  = Índice de servicio presente

$\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado

$p_o$  = Índice de servicio inicial

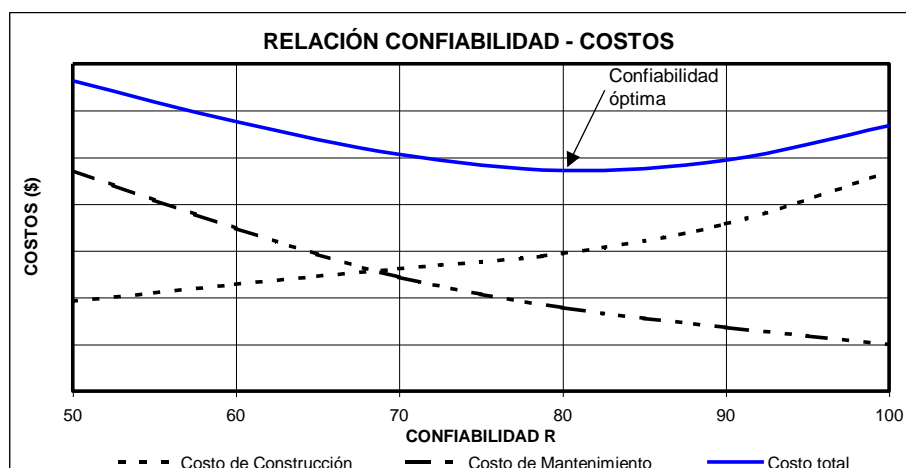
$p_t$  = Índice de servicio final

### Confiabilidad:

La Normativa de diseño AASHTO 93, ha introducido el concepto de Confiabilidad, que constituye la probabilidad de que el sistema estructural que forma el pavimento cumpla su función prevista, dentro del Periodo de Análisis (vida útil) y bajo las condiciones ambientales que tienen lugar en ese lapso. Un nivel de confiabilidad alto implica un pavimento con un mayor costo de construcción, pero por otra parte dicho pavimento requerirá menores costos de mantenimiento. Por el contrario, un nivel de confiabilidad bajo da pavimentos más económicos, pero con un mayor costo de mantenimiento”.

En tal sentido el método AASHTO 93 considera que hay un nivel de confiabilidad óptimo, en el cual la suma de los costos iniciales y de mantenimiento dan un mínimo. En el siguiente gráfico se representa la

Ilustración 36 : Relación confiabilidad - costo



El gráfico anterior es solo a título ilustrativo, ya que el trazado de las curvas de costo de ejecución y costo de mantenimiento dependerá de las características particulares de cada proyecto. [19]

En general el método AASHTO 93, recomienda los siguientes niveles de confiabilidad:

Tabla 14: Niveles de confiabilidad por tipo de vía

Fuente: tabla 2.2 AASHTO 93

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad (R) recomendado	
	Urbana	Rural
Interestatales y vías rápidas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

### Desviación Estándar:

La varianza ( $S_o$ ) del comportamiento del pavimento y el tránsito previsto para el período de diseño pueden ser estimados, para un caso de diseño en particular, si se dispone de suficiente información.

La tabla que se indica a continuación contiene valores de desviación estándar, recomendados por AASHTO a partir de un análisis de Varianza que existía en el AASHO Road Test, y en base a predicciones futuras de tránsito:

Tabla 15: Valores de Desviación estándar

Fuente: AASHTO 93

Variación en la predicción del comportamiento del pavimento	Desvío estándar ( $S_o$ )	
	Pavimentos Rígidos	Pavimentos Flexibles
Sin errores en el tránsito	0,34	0,44
Con errores en el tránsito	0,39	0,49

### Coeficiente de drenaje:

Un buen drenaje aumenta la capacidad portante de la sub rasante y de las capas de base y sub base (el módulo resiliente aumenta cuando baja el contenido de humedad), mejorando la calidad del camino y permitiendo el uso de capas más delgadas.

En función de los tiempos requeridos para drenar la capa de base hasta un grado de saturación del 50% y 85%, AASHTO define las siguientes calidades de drenaje:

Calidad de drenaje	50% de saturación en:	85% de saturación en:
Excelente	2 horas	2 horas
Buena	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	Más de 10 horas
Muy pobre	El agua no drena	Mucho más de 10 horas

La calidad de drenaje, determinada de la manera indicada, se refleja en la obtención del número estructural SN a través de coeficientes de drenaje mi que afectan solamente a las capas no ligadas. Para el caso de pavimentos flexibles AASHTO recomienda los siguientes Coeficientes de drenaje: [19]

Calidad de drenaje	Porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 a 5%	5 a 25%	> 25%
Excelente	1,25 a 1,20	1,20 a 1,15	1,15 a 1,10	1,10
Buena	1,20 a 1,15	1,15 a 1,10	1,10 a 1,00	1,00
Regular	1,15 a 1,10	1,10 a 1,00	1,00 a 0,90	0,90
Pobre	1,10 a 1,00	1,00 a 0,90	0,90 a 0,80	0,80
Muy pobre	1,00 a 0,90	0,90 a 0,80	0,80 a 0,70	0,70

### Ejes equivalentes (ESAL'S):

El procedimiento de diseño está basado en el número acumulado de ejes equivalentes al eje simple de 18 kips (ESAL's) durante el periodo de análisis (W18). La información obtenida del Estudio de Transito, está constituida por el

TMDA del tránsito existente, el Transito Derivado, el Transito Inducido y el transito generado.

Por otra parte, fundamentado en variables económicas y de crecimiento de población, se han determinado las tasas de crecimiento estimadas para cada una de las categorías de vehículos componentes de la flota cuya circulación este prevista en el tramo en estudio.

El estudio de tránsito ha sido desarrollado sobre la base de la realización de relevamientos referidos a volumen actual de vehículos, y encuestas de origen y destino de los viajes y datos relativos a la asignación vial de dichos viajes. La proyección del tránsito que circulará por la ruta en estudio comprende básicamente los siguientes tipos de usuarios:

- Los usuarios “existentes” son aquellos que actualmente emplean la vía, y los que la emplearán en el futuro, aunque ésta no mejorara y continuara en sus condiciones actuales.
- Los usuarios “derivados” son aquellos que actualmente emplean otras calles o rutas y que serán atraídos por el acceso a ser habilitado o mejorado.
- El tráfico “inducido” no existe ni existiría en el futuro de no mejorarse la vía.
- Trafico “Generado”. Este tráfico se genera por efecto de la habilitación del nuevo acceso vial o el mejoramiento de la ruta existente. [19]

Para determinar el número de ejes equivalentes en el periodo de diseño se requiere en primer lugar la determinación del Numero de Ejes equivalentes en el carril de diseño, el cual se determina según la siguiente ecuación:

$$W_{18} = D_D \times D_L \times W_{18}^{\wedge}$$

Dónde:

$W_{18}$  = tráfico (o carga) en el carril de diseño

$D_D$  = factor de distribución direccional, expresado como una relación, que toma en cuenta la distribución de cargas por dirección. Por ejemplo, una dirección puede soportar la mayor parte del tráfico pesado y así debe ser diseñada en

forma diferente o, como mínimo, la misma puede controlar el diseño estructural. Generalmente en vías de dos carriles se toma como 0,5 (que corresponde a 50%) para las rutas en la que no están disponibles informaciones detalladas del tráfico.

$D_L$  = factor de distribución por carril, expresada como una relación, que toma en consideración la distribución de las cargas cuando dos o más carriles son disponibles en una dirección. Por ejemplo, en la mayoría de rutas interestatales, los carriles exteriores soportan la mayoría del tráfico pesado de camiones, que se aprecia en la Tabla.

Tabla 16: Valores recomendados de  $D_L$  fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.

VALORES REDOMENDADOS DE $D_L$	
Número de carriles en cada Dirección	% de cargas en carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

$W_{18}^{\wedge}$  = Las cargas acumuladas en ambas direcciones, previstas para una específica sección de la infraestructura durante el periodo de diseño.

Siendo:

$$W_{18}^{\wedge} = \text{TMDA año horizonte de diseño} \times \frac{[(1+i)^n - 1]}{i} \times 365 \times \text{FC}$$

### Factor Camión (Fc):

EL Factor Equivalente de Carga (FEC) da una manera de expresar los niveles equivalentes de daño entre ejes, pero también es conveniente expresar el daño en términos del deterioro producido por un vehículo en particular, es decir los daños producidos por cada eje de un vehículo son sumados para determinar el

daño producido por el total. Así nace el concepto de Factor de Camión (FC) que se define como el número de ejes simples equivalentes de referencia (80Kn) que producirían en el pavimento un daño equivalente al de una pasada de un vehículo comercial promedio.

El factor de camión se puede determinar de manera individual para cada tipo de vehículo comercial o como promedio de todo el flujo de tránsito pesado. Es más exacto considerar factores de camión para cada clasificación general de camiones.

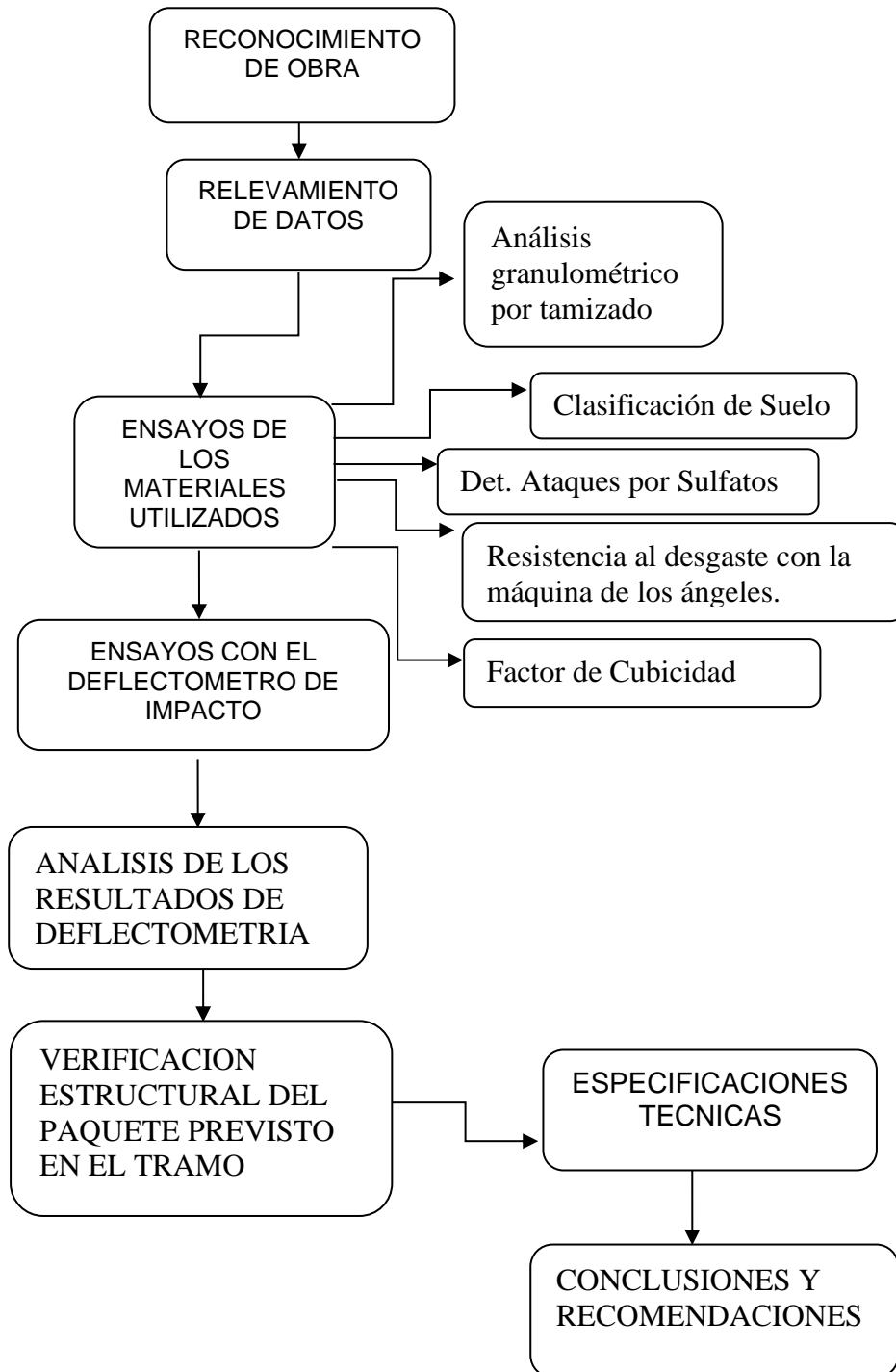
Tabla 17: Factor de equivalencia de carga de AASHTO

Tipo de Eje	Ecuaciones
Eje simple	$FC = (P/7,77)^{4.32}$
Eje simple doble	$FC = (P/8,17)^{4.32}$
Eje tándem doble	$FC = (P/15,08)^{4.14}$
Eje trídem doble	$FC = (P/22.95)^{4.22}$

## CAPÍTULO 3

### 3.1. METODOLOGIA

#### 3.1.1 PLAN DE ACTIVIDADES



### 3.1.2 DESCRIPCION DEL ENFOQUE METODOLOGICO

La metodología de trabajo propuesta para la realización del Proyecto Final de Grado, “**Determinación del módulo resiliente para capa base de macadam hidráulico, mediante el retrocálculo en el tramo Santo Domingo - Juan de Mena**”, además de definir los trabajos y sistemas a emplear, describen los procedimientos que se llevaran a cabo en las distintas actividades.

En este sentido la metodología adoptada conducirá a exhaustivo control de los diferentes trabajos y procedimientos a realizar, para el cumplimiento de estos se ha formulado una Metodología de trabajo en 7 (siete) fases que engloban los diferentes trabajos a desarrollar:

#### 1. FASE I: RECONOCIMIENTO DE OBRA:

Esta fase contempla una visita a obra con el objeto de hacer un reconocimiento y determinar particularidades del tramo de estudio seleccionado

#### 2. FASE II: RELEVAMIENTO DE DATOS.

Con el fin de recabar información es recomendable y necesario el relevamiento de datos, obtener muestras de materiales utilizados para la construcción de la capa base de macadam hidráulico, que forma parte del sistema multicapas del paquete estructural.

#### 3. FASE III: ENSAYOS DE LABORATORIO.

Para identificar y clasificar los tipos de materiales utilizados en la construcción de la base, es indispensable realizar ensayos de los diferentes materiales constituyentes.

La empresa contratista CONSTRUPAR encargada de la ejecución de la obra que involucra este proyecto, ha realizado algunos ensayos a fin de cumplir con los requisitos necesarios para la aprobación del tramo, se consideran que los resultados son totalmente confiables por esa razón serán utilizados y tenidos

en cuenta en este trabajo de investigación. Los ensayos adicionales necesarios se llevarán a cabo como corresponde.

Los ensayos requeridos para la caracterización de los materiales que constituyen la capa base del macadam hidráulico son los siguientes:

- a) Análisis granulométrico por tamizado
- b) Clasificación de suelo
- c) Determinación de ataques por sulfatos en agregados
- d) Factor de cubicidad
- e) Resistencia al desgaste con la máquina de los ángeles

#### 4. FASE IV: ENSAYO DE CAMPO.

Para la evaluación de la base de macadam se utilizara un Deflectómetro de Impacto (DWF) de la empresa consultora METRICA de la marca ..... que permitirá conocer el comportamiento del paquete estructural del tramo seleccionado.

Este ensayo se llevará a cabo en 8 puntos aleatorios del tramo, a fin de obtener resultados representativos de los materiales de la capa base de macadam que forma parte del paquete estructural.

#### 5. FASE V: ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE DEFLECTOMETRIA.

El deflectómetro de impacto no es un método directo para determinar el módulo resiliente, para conocer dicho valor es necesario desarrollar una metodología llamada retrocálculo o retroanálisis que nos permitirá evaluar los resultados obtenidos del deflectómetro de impacto.

#### 6. FASE VI: VERIFICACION DEL PAQUETE ESTRUCTURAL

En este apartado se busca la verificación del paquete estructural de proyecto utilizado en el tramo, con el nuevo paquete calculado considerando las características de las distintas capas que fueron definidas en este trabajo de investigación.

## 7. FASE VII: ESPECIFICACIONES TECNICAS

Consiste en la elaboración de la especificación técnica de la capa base de macadam hidráulico, con la intención de describir el proceso constructivo y consideraciones que se han tenido en cuenta para la construcción de la capa base, englobando las condiciones de trabajo, características de materiales y otros factores para la obtener dicha capacidad estructura.

## **CAPÍTULO 4**

### **CARACTERIZACION DE MATERIALES**


Las propiedades y características de los materiales a utilizar en un paquete estructural son enormemente variables de acuerdo al tipo de suelo o material utilizado y a la historia particular de la región donde se encuentra, y como se sabe el comportamiento estructural de los materiales que componen el paquete de firmes está influenciada en gran medida en sus diferentes características. En este proyecto se busca caracterizar los materiales que forman parte de la capa base de Macadam Hidráulico.

Los materiales son extraídos de la cantera El Camino que está ubicada aproximadamente a 1500 metros de la Ruta Nacional PY08 “Dr Blas Garay”. La cantera es explotada con fines comerciales y de allí se obtienen rocas basálticas, dicha cantera es la que abastece de material a toda la obra. A continuación, se anexan ensayos llevados a cabo para materiales de la cantera denominada El Camino que fueron proporcionadas por el Consorcio YHAGUY:


#### **4.1. RESISTENCIA AL DESGASTE CON LA MAQUINA DE LOS ANGELES:**


El ensayo de resistencia al desgaste con la máquina de los ángeles, fue realizada en la Universidad Nacional de Asunción con muestras de materiales extraídas de la cantera El Camino, el ensayo antes mencionado lanzo el siguiente resultado, obteniéndose 15.1% de pérdida por abrasión como se puede observar en la ilustración:

Ilustración 37: Resultado del ensayo de Resistencia al desgaste con la Máquina de los Ángeles

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>			
<b>DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE Y VIAS</b> <b>LABORATORIO DE GEOTECNIA Y ASFALTO</b>			
<b>INFORME DE ENSAYO N° 34 .</b>			
<b>Resistencia al desgaste Con La Máquina De "Los Ángeles".</b>			
COMITENTE: CONSORCIO YHAGUY.			FECHA: 27 /OCT/ 2.018
MUESTRA: Triturada; Cantera El Camino.			
TIPO DE MUESTRA: Piedra Triturada (tipo basálto).			
NORMA UTILIZADA: UNE 83 - 116 - 90; IRAM 1532/71.			
1	<b>Determinación N°</b>		<b>1</b>
2	<b>Material Ensayado</b>	<b>Tipo</b>	<b>B</b>
3	Serie (1) Tamices Pasante #	#	# <sup>3</sup> / <sub>4</sub> " a # <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "
4	Serie (2) Tamices Retenido #	#	# <sup>1</sup> / <sub>2</sub> " a # <sup>3</sup> / <sub>8</sub> "
5	Serie (3) Tamices #	#	*****
6	Serie (4) Tamices #	#	*****
7	Peso de Material en Pas. # <sup>3</sup> / <sub>4</sub> Ret. # <sup>1</sup> / <sub>2</sub> .	gr.	2.501
8	Peso de Material en Pas. # <sup>1</sup> / <sub>2</sub> Ret. # <sup>3</sup> / <sub>8</sub> .	gr.	2.502
9	Peso de Material en Pas. # Ret. #	gr.	0
10	Peso de Material en Pas. # Ret. #	gr.	0
11	Cargas Abrasivas	Esferas	11
12	Giro del Cilindro	Vueltas	500
13	Peso Total Antes (M)	gr.	5.003
14	Peso Total Después (M1)	gr.	4.246
15	Pérdida Por Abrasión ((M-M1)/M)*100	%	<b>15,1</b>

OBSERVACION: El resultado presentado corresponde, únicamente, a la muestra suministrada por el Comitente.



  
**Prof. Ing. Francisco Ortiz.**  
 Jefe de Laboratorio de Geotecnia y Asfalto.

Pag. 3 de 4

## 4.2. ENSAYO DEL FACTOR DE CUBICIDAD:


El ensayo de factor de cubicidad para materiales de la cantera utilizada en el proyecto, arrojó como resultado  $F_c = 0.5$ , que representa un valor medio entre el rango de valores que dicho parámetro puede tomar (0, 1), en la ilustración se aprecia el resultado obtenido:

Ilustración 38: Resultado del ensayo de Factor de Cubicidad



**DIRECCIÓN DE DEPARTAMENTOS**  
**INFORME DE ENSAYO**

**Datos del Solicitante:** DD-DQM-10/17  
 Empresa : CONSORCIO YHAGUY  
**Ensayos:** Factor de Cubicidad.  
**Ensayo realizado en:** Laboratorio de Materiales de Construcción  
 Fecha del Informe: 30/10/2018

  
 Prof. Ing. Juan Pablo Bellasai  
 Director de Departamentos

---

**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y MATERIALES**  
**DETALLE Y RESULTADOS DEL ENSAYO**

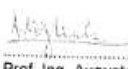
Material a Ensayar : CANTERA EL CAMINO PIEDRA TRITURADA STA  
 Norma utilizada : IRAM 1681  
 Graduación utilizada : "D"

Fracción	Pasa Por Tamiz Tamaño Directriz Mm	Retenido Por Tamiz mm	Masa de la Fracción (A)	Agregado Retenido Por la Criba Reductora				Masa del Material del Fondo (F)
				I(RI)		II(RII)		
				Masa (B)	Masa (C)	Masa (D)	Masa (E)	
1	9.5	6.3	1000	385	38.5	230	23	385
Σ					38.5		23	

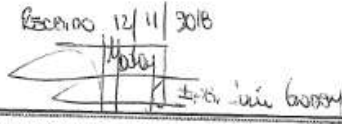
$f = \frac{\sum R(I) + \frac{1}{2} \sum R(II)}{100 \times n} = 0.50$

donde: f = Factor de cubicidad; n = número de fracciones  
 Este factor de cubicidad toma valores próximos a uno para agregados de cubicidad óptima y valores próximos a cero para los de cubicidad deficiente (partículas sumamente achatadas o lajosas).

Los resultados obtenidos corresponden única y exclusivamente a la muestra de materiales suministrada por la firma interesada.

  
 Prof. Ing. Augusto Acosta  
 Jefe Dpto. de Química y Materiales

Recorrido 12/11/2018




---

Campus de la UNA- San Lorenzo, Teléf. /Fax.: (021) 585-581/4-Casilla de Correo Nro. 765  
 Filial Isla Bogado - Luque, Paraguay- Teléfono. /Fax.: (021) 644-070 E-mail: inf@ing.una.py

### 4.3. ENSAYOS DE DETERMINACION DE ATAQUE POR SULFATOS EN AGREGADOS:


Este ensayo consiste en determinar el porcentaje de pérdida o desgaste de material producidas por su contacto de Sulfato de sodio o sulfato de magnesio, el ensayo correspondiente fue llevada a cabo en el laboratorio de la Universidad Nacional de Asunción, y se aprecia en la siguiente ilustración:

Ilustración 39: Resultado del ensayo de Determinación de ataque por Sulfato en Agregados



**DIRECCIÓN DE DEPARTAMENTOS**  
**INFORME DE ENSAYO**

**Datos del Solicitante:** **DD-DQM-14/18**  
Empresa: **CONSORCIO YHAGUY**  
**Ensayo:** **Determinación de ataque por Sulfato en Agregados**  
**Ensayo realizado en:** Laboratorio de Materiales de Construcción  
**Obra:** **CANTERA EL CAMINO**  
Fecha del Informe: 30/10/2018

  
Prof. Ing. Juan Pablo Bellasai  
Director de Departamentos

---

**DETALLE Y RESULTADOS DEL ENSAYO**

**Ensayo:** **Determinación del ataque por sulfato de sodio**  
**Material a Ensayar:** CANTERA EL CAMINO  
**Norma utilizada :** IRAM 1525

Material que pasa el tamiz (m.m.)	Material que retiene el tamiz (m.m.)	Graduación de la muestra original %	Masa de la fracción antes del ensayo (gramos)	Material que pasa el tamiz después del ensayo (pérdida real) %	Pérdida corregida %
19	9,6	80	1000	2	1,6
TOTAL					1,6

Los resultados obtenidos corresponden exclusivamente a las muestras suministradas por la firma interesada.  
Según Norma IRAM 1531 5.1.4.1  
"El agragado Grueso debe tener una pérdida de masa menor o igual a 12%, luego de ser sometido a 5 ciclos alternados de inmersión y secado en una solución saturada de sulfato de sodio a la norma IRAM 1525."  
Los resultados obtenidos corresponden exclusivamente a las muestras suministradas por la firma interesada.

  
Prof. Ing. Augusto Acosta  
Jefe Dpto. de Química y Materiales

---

Campus de la UNA- San Lorenzo, Telet. /Fax.: (021) 585-581/4-Casilla de Correo Nro. 765  
Filial Isla Bogado - Luque, Paraguay- Teléfono. /Fax.: (021) 544-070 E-mail: inf@ing.una.py

#### 4.4. GRANULOMETRIA DE LA PRIMERA CAPA:

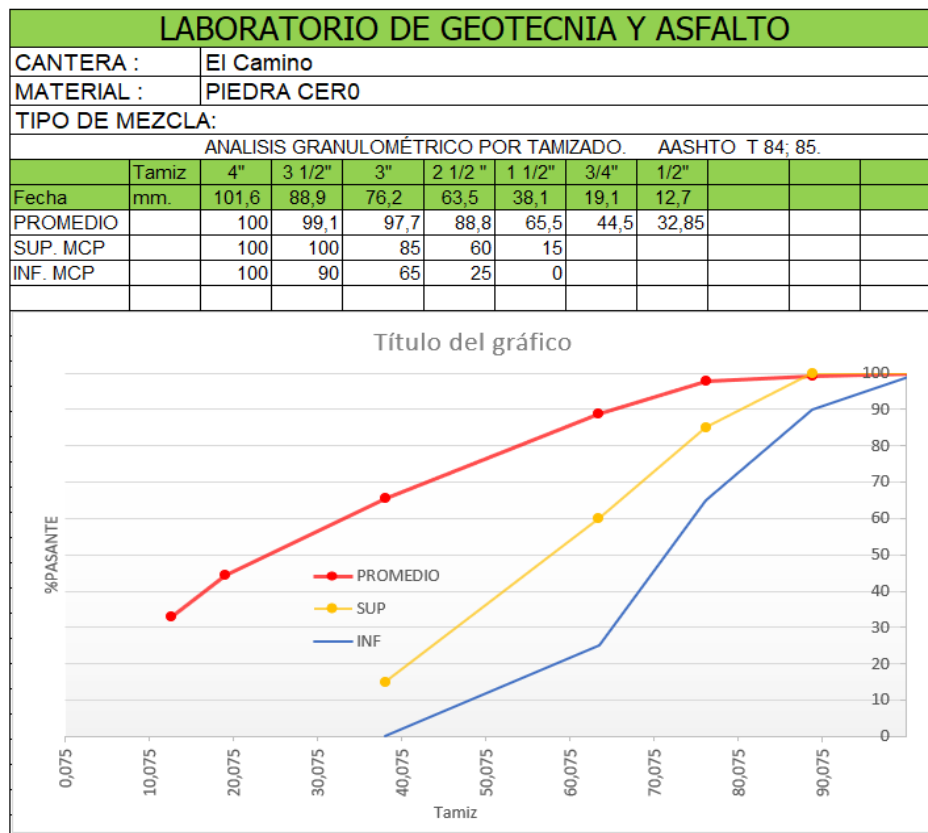
La primera capa está constituida de piedra basáltica con diámetros de 4 pulg denominada (cero), extraídas directamente de la cantera para su colocación.

Tabla 18: Ensayo de Granulometría piedra CERO

LABORATORIO DE GEOTECNIA Y ASFALTO										
CANTERA :		El Camino								
MATERIAL :		PIEDRA CERO								
TIPO DE MEZCLA:										
ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO. AASHTO T 84; 85.										
	Tamiz	4"	3 1/2"	3"	2 1/2 "	1 1/2"	3/4"	1/2"		
Fecha	mm.	101,6	88,9	76,2	63,5	38,1	19,1	12,7		
26/2/2019		100	100	98,3	86,3	64,9	46,3	35,1		
26/2/2019		100	98,2	97,1	91,3	66,1	42,7	30,6		

De la serie de muestras analizadas se realizará el promedio entre las fajas granulométricas, a modo de ser representativas para las muestras tomadas, la siguiente ilustración muestra la curva granulométrica correspondiente a la primera capa:

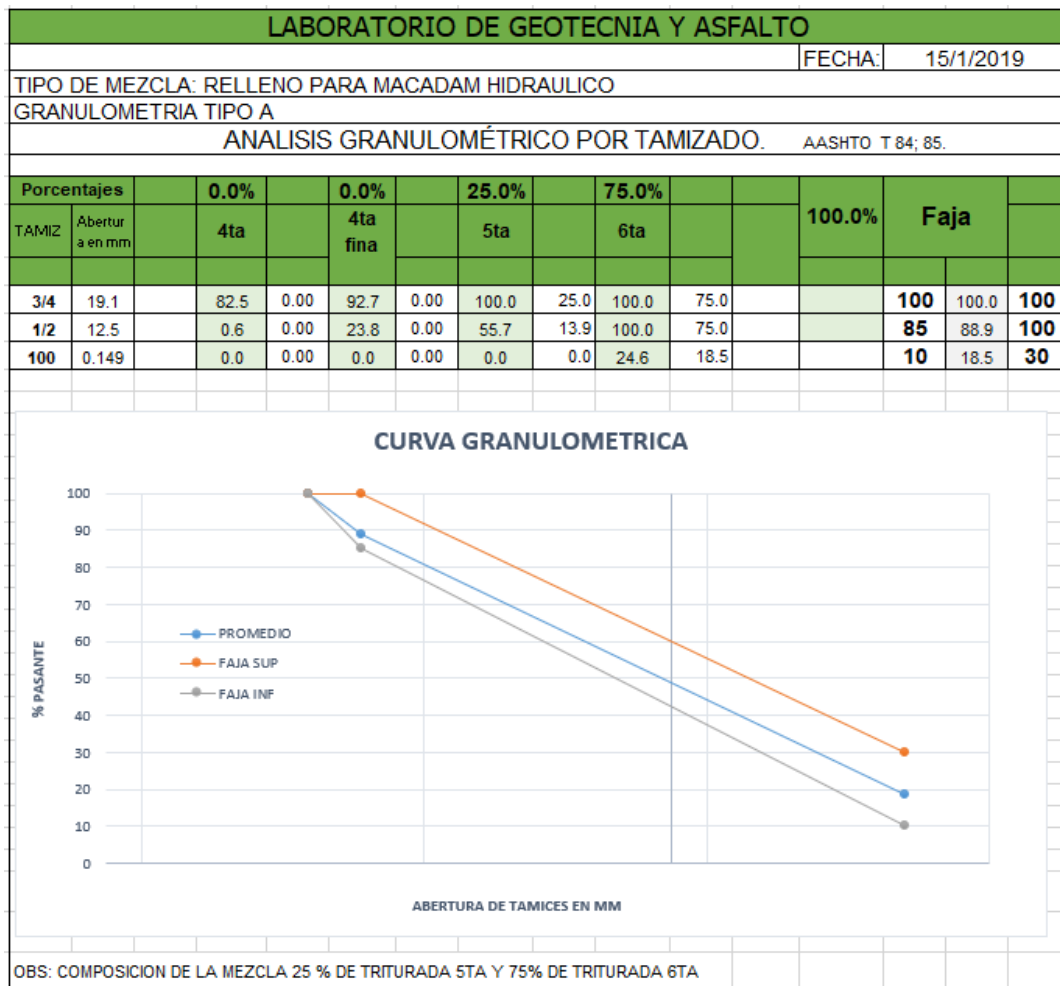
Tabla 19: Curva granulométrica para la piedra Cero



#### 4.5. GRANULOMETRIA ARENA DE RELLENO – PRIMERA CAPA:

Como material para el relleno de los espacios generados entre las piedras de 4 pulg de la primera capa se colocarán una mezcla de material de trituración 5ta y 6ta en la siguiente proporción, 75% 6ta y 25%5ta, en la siguiente ilustración se puede observar la curva granulométrica correspondiente a al material de relleno de la primera capa.

Tabla 20: Resultado de ensayo Granulométrico, relleno para macadam



#### 4.6. ANALISIS GRANULOMETRICO – SEGUNDA CAPA

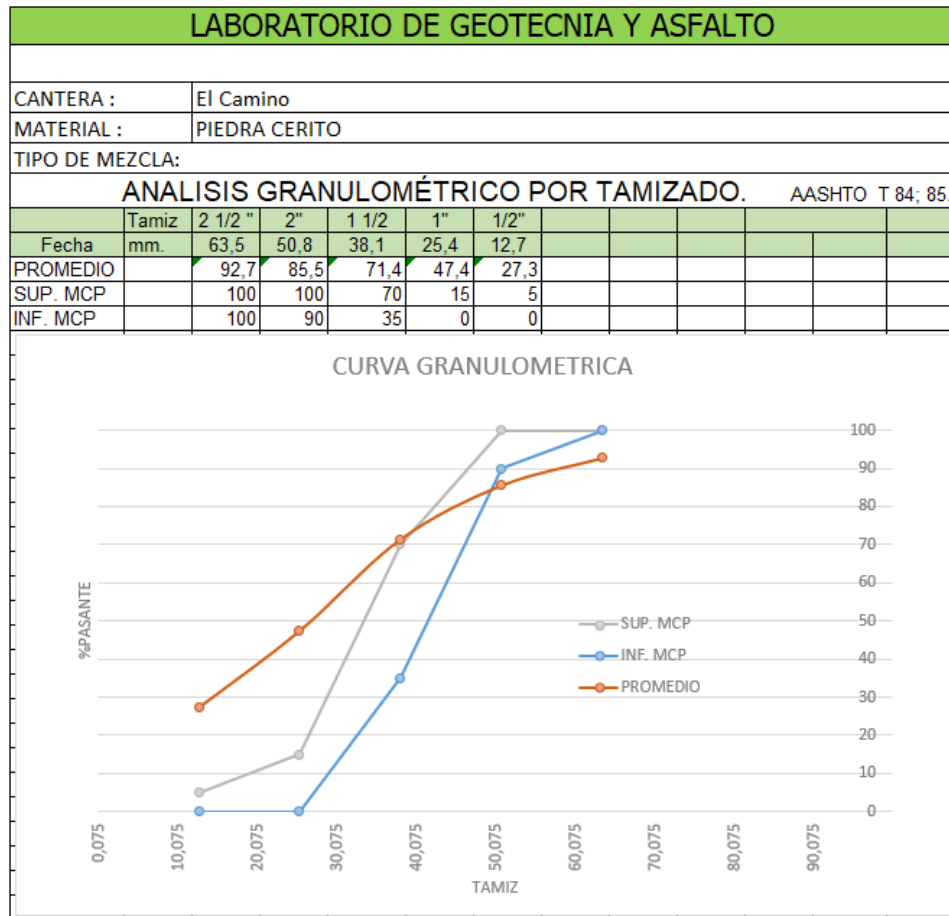
La segunda capa (cerito), corresponde a piedras basálticas de diámetros aproximados de (2 1/2) 3 pulg, extraídas directamente de la cantera para su utilización, en la siguiente tabla se observa la serie de ensayos realizados:

Tabla 21: Ensayo de Granulometría piedra CERITO

LABORATORIO DE GEOTECNIA Y ASFALTO											
CANTERA :		El Camino									
MATERIAL :		PIEDRA CERITO									
TIPO DE MEZCLA:											
ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO.										AASHTO T 84; 85.	
Fecha	Tamiz mm.	2 1/2 "	2"	1 1/2 "	1"	1/2 "	4	8	10	FAJA ESPECIF.	
		63.5	50.8	38.1	25.4	12.7	4.76	2.38	2.00	SUP	INF
11/1/2019		75.7	69.4	62.6	46.7	28.6				100	100
11/1/2019		85.3	80.7	60.4	40.5	26.8				100	90
16/1/2019		96.2	94.8	83.8	55.4	30.4				70	35
17/1/2019		99.4	99.1	95.3	74.4	45.6				15	0
21/1/2019		100.0	91.7	83.0	55.9	31.2				0	0
22/1/2019		98.6	95.0	76.3	52.5	31.9					
23/1/2019		95.0	83.5	56.5	10.6	0.4					
24/8/2009		96.3	84.6	69.1	51.2	32.0					
21/2/2019		87.7	70.7	55.7	39.3	18.5					

De la serie de muestras analizadas se realizará el promedio entre las fajas granulométricas, a modo de ser representativas para las muestras tomadas, la siguiente ilustración muestra la curva granulométrica de dicho material:

Tabla 22: Curva granulométrica para la piedra Cerito



#### 4.7. GRANULOMETRIA MATERIAL DE RELLENO-SEGUNDA

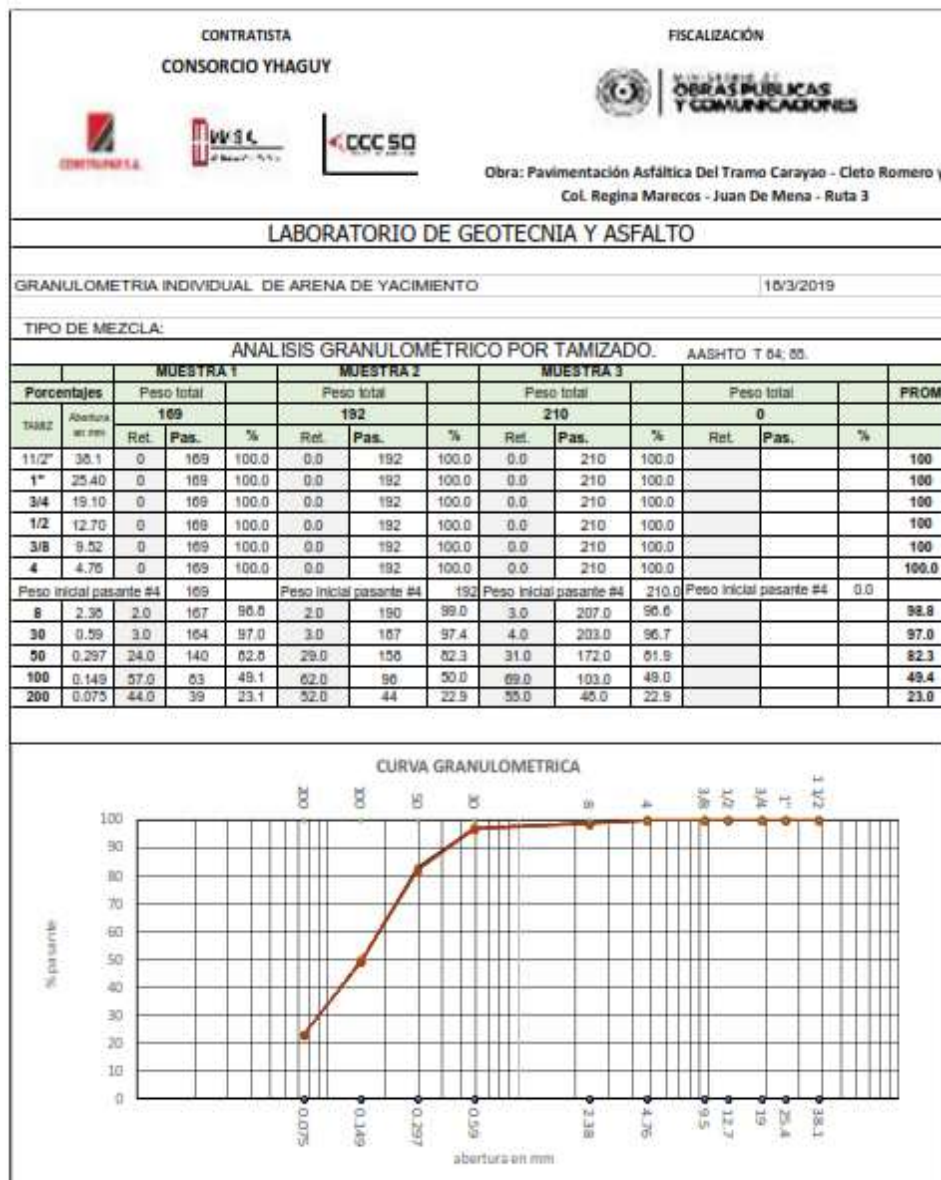
##### CAPA:

Esta capa de relleno es colocada por encima de la segunda capa de piedra (cerito) con el fin de ocupar los espacios vacíos que se puedan tener en la capa superior, este compuesto por una mezcla de material de trituración 6ta y arena de yacimiento NP, a continuación, se presentan los siguientes ensayos.

### 4.7.1. ANALISIS GRANULOMETRICO - ARENA DE YACIMIENTO

La arena utilizada corresponde a un yacimiento ubicado en el mismo predio de la cantera El Camino, en la siguiente ilustración se observa la granulometría de dicho material.

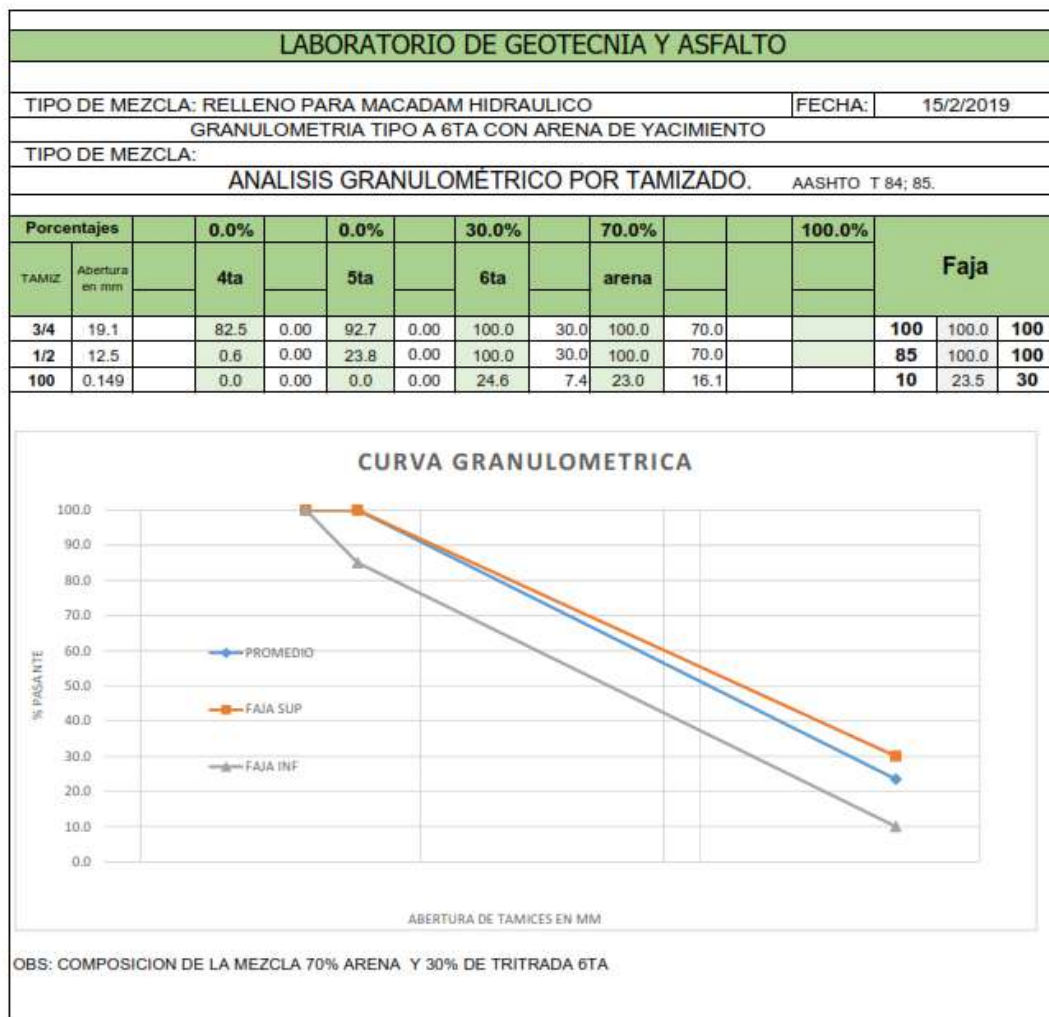
Tabla 23: Resultado Granulométrico de arena de yacimiento



### 4.7.2. ANALISIS GRANULOMETRICO - ARENA DE YACIMIENTO CON TRITURADA 6ta.

Como arriba se menciona, el material de relleno para la capa superior de piedra (cerito) es una mezcla de arena de yacimiento con triturada 6ta con una distribución, 30% triturada 6ta y 70% arena.



Tabla 24: Resultado Granulométrico arena de yacimiento con triturada 6ta



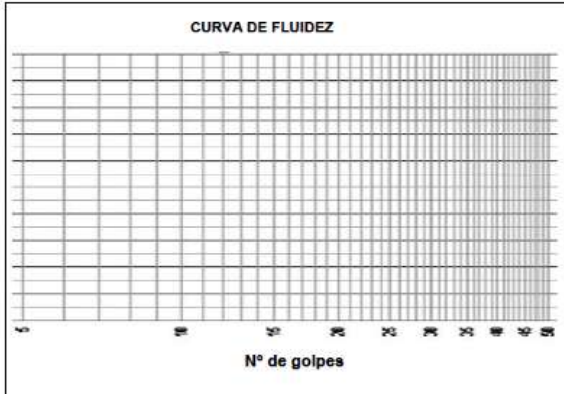
### 4.1.1. LIMITES DE ATTERBERG - ARENA DE YACIMIENTO

En la siguiente ilustración se ven los resultados de los límites de Atterberg que se llevaron a cabo, donde se puede apreciar como resultado que la arena corresponde a una arena no plástica (NP)

Tabla 25: Resultado de límites de Atterberg

CONTRATISTA CONSORCIO YHAGUY		FISCALIZACIÓN	
		 Obra: Pavimentación Asfáltica Del Tramo Carayao - Cleto Romero y Col. Regina Marecos - Juan De Mena - Ruta 3	
<b>ENSAYO: LIMITES DE ATTERBERG</b>			
Método: AASHTO T-89-02			
Progresiva:	ACOPIO EN CANTERA CARAYAO	Ensayo N°	FECHA
Muestra N°:	ARENA DE YACIMIENTO		18-03-19
Sondaje N°:	A 1500 M DE LA RUTA N	Profundidad:	
Préstamo:			
<b>LIMITE LIQUIDO</b>			
	Cápsula N°:	30	15
1	Número de Golpes		
2	Tara + Peso material húmedo	gr.	
3	Tara + Peso material seco	gr.	
4	Peso del Agua (2 - 3)	gr.	NP NP
5	Peso de la Tara	gr.	
6	Peso material seco (3 - 5)	gr.	
7	Humedad (4/6)	%	
8	Factor corrección		
9	Humedad Corregida (7 x 8)	%	
10	Humedad Promedio	%	
<b>LIMITE PLÁSTICO</b>			
	Cápsula N°	38	4
11	Tara + Peso material húmedo	gr.	
12	Tara + Peso material seco	gr.	
13	Peso del Agua (11 - 12)	gr.	NP NP
14	Peso de la Tara	gr.	
15	Peso material seco (12 - 14)	gr.	
16	Humedad (14/16)	%	
17	Humedad Promedio	%	
<b>GRANULOMETRÍA</b>			
		Peso Gr.	%
TAMIZ	Total	<b>169</b>	
10	Ret.	0.00	
	Pas.	169	100.0
40	Ret.	18	
	Pas.	151	89.3
200	Ret.	125	
	Pas.	26	15.4
RESULTADOS		VALORES ESPECIF.	
L.L.:	NP		
L.P.:	NP		
I.P.:	0.0		
I.G.:	0		
Clas.:	A-2-4		
<b>Observaciones:</b>			

Humedad %



## CAPITULO 5

### ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE DEFLECTOMETRIA

Las mediciones de las deflexiones fueron realizadas con el equipo de la empresa **METRICA S.A**, con un deflectómetro de impacto FWD marca Dynatest 8082 con un plato de carga de 30cm de diámetro, y siete sensores ubicados a 0, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm del centro del plato de carga, aplicando una carga en el entorno de los 5098.58 Kg (50kN)

*Ilustración 40: Equipo FWD (METRICA) para el análisis deflectométrico*



Las deflexiones medidas se resumen en las siguientes ilustraciones:

### Ascendente

StationID	PK	Surface	Air	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	44+000	45,4	41	49,25	317,7	202,4	141,8	90	60,3	34,3	24,5
1	44+000	45,4	41	49,76	303,2	192,3	136,2	88	61	35,3	25,8
4	45+508	45,8	42,8	49,54	400,3	256,1	170,4	95,6	59,7	30,9	22,2
4	45+508	45,7	42,8	49,32	383,6	246,8	166,4	95,6	60,9	31,9	22,5
5	46+000	45,8	42,9	49,32	364,7	221,4	143,2	75,2	43,4	26,9	20,5
5	46+000	45,7	42,9	49,3	350,7	214,9	141,5	77,1	45,8	27,5	20,2
6	46+520	46	42,9	49,8	452	288,8	205,8	122,7	73,7	35,6	26,6
6	46+520	46	42,9	49,89	425,9	282,4	206,8	126,2	77,3	37,1	26,2
7	47+002	45,5	42,8	49,41	376,4	234,7	171,8	103,7	67,2	38,7	29
7	47+002	45,5	42,8	49,32	356,5	223,3	167,3	105,6	71,4	40,4	29,8
10	48+501	45,3	42,6	48,99	461,6	320	218,5	110,8	68	40,9	30,5
10	48+501	45,3	42,6	49,48	441	309,3	215	112,4	71,1	42,5	31
18	52+501	45,2	42,7	49,61	403,9	249,6	170,6	107,2	75,9	46,8	32,4
18	52+501	45,2	42,7	49,55	386,4	242	169	109,5	78	48,3	31,9
19	53+004	44,7	42,7	49,27	403,4	242,7	176,5	111	79	45,1	28,4
19	53+004	44,7	42,7	49,41	384,6	235,6	175,3	112,5	79,9	46,4	27,7
20	53+497	45,2	42,7	48,81	325,9	206	131,6	71,7	50,5	30,9	23,5
20	53+497	45,2	42,7	48,83	312,5	199,5	132,2	76,1	55	33,9	24,1
21	53+988	45,1	42,7	49,71	409,2	265	196,4	127,2	89,6	50,9	35,9
21	53+988	45,1	42,7	49,62	390,5	259,1	195,6	128,6	91,1	51,3	35,8

### Descendente

StationID	PK	Surface	Air	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	53+988	45	42,8	49,02	307,5	200,1	143,6	91,1	63,1	42,5	28,9
1	53+988	44,9	42,8	49,32	295,1	197,4	142,6	91,9	65,6	40,9	29,3
2	53+500	44,9	42,8	49,59	364,1	247,3	185,3	114,9	73	31,6	21,8
2	53+500	44,9	42,8	49,57	347,9	238,6	180,9	114,4	73,3	33,1	21,5
3	53+000	44,9	43	48,87	361	228,3	159,6	104,1	78,8	49,5	35,7
3	53+000	45	43	48,94	346,2	222,1	158,2	105,1	80,7	51,7	36,3
4	52+503	45,7	43,1	48,23	361,3	221,5	152,5	92,9	64,1	41,2	31,6
4	52+503	45,8	43,1	48,63	341,6	219,6	157,3	100,2	70,5	45,4	32,8
13	48+001	46	44	48,33	480,2	297,7	202,1	116,7	76,4	45,8	32,1
13	48+001	45,9	44	48,65	468,8	292,9	200,1	117,8	77,6	46	31,9
15	47+000	46,4	44,1	49,06	376,2	220,4	147,7	85,5	60,4	38	27,5
15	47+000	46,4	44,1	49,2	344,2	211,1	147,7	89,3	63,7	38,9	27,5
16	46+497	46,3	44,2	47,88	268,5	168,9	125,7	74	49,8	31,4	22,1
16	46+497	46,3	44,2	48,26	259,1	163,9	123,7	76,2	52,2	33	22,5
17	46+010	45,9	44,2	49,5	481,9	282,7	181,8	97,1	58,4	30,2	23
17	46+010	45,9	44,2	49,71	453,8	272,3	182,3	100,9	61,7	32,1	24,6
18	45+500	45,8	44,3	48,53	474,8	295,5	190,3	102,7	62,3	29,8	22,3
18	45+500	45,8	44,3	48,72	449,2	284,4	186,7	103,5	64,2	32,1	23,2
19	45+000	45,8	44,2	49,09	419,2	248,1	156,2	74	43,8	25,4	18,2
19	45+000	45,8	44,2	48,97	402,3	239,8	153,9	75,5	46,6	26,5	18,6
20	44+496	45,9	44,3	48,9	348,6	218,3	160	98,3	65,7	34,8	23
20	44+496	45,9	44,3	48,9	332	216,3	160,8	100,3	67,3	35	24,4
21	44+100	46,3	44,3	49,23	375,3	233,2	169,5	105,1	71,6	35,9	24,7
21	44+100	46,3	44,3	49,15	359,9	226,8	167,8	104,6	71,7	35,9	25

Se realizaron mediciones aproximadamente cada 500 (m), llevándose a cabo dos ensayos por cada punto, lo que nos proporciona dos cuencos de deflexiones para un mismo lugar, para el retrocálculo se toma el segundo cuenco generado ya que el primer ensayo se considera de acomodo del material.

Las deflexiones obtenidas fueron procesadas y retrocalculados en el programa de procesamiento de datos, BackVide 2018, que es programa desarrollado por medio del Laboratorio vial de IMAE, un método mecanicista que analiza capa por capa el módulo de cada una de ellas, como se describe en el **capítulo 2** (2.5.3. Evaluación Estructural, Método Mecanicista).

Este programa considera diversos parámetros para entrada de datos, como son el radio del plato de carga, la presión ejercida por el plato, y las deflexiones medidas en cada punto, que son parámetros obtenidos de la deflectometría realizado con el deflectometro de Impacto FWD, así también se necesita definir valores semilla de los módulos de las distintas capas que componen el paquete de firmes.

El valor semilla considerado para la capa base de Macadam Hidráulico en los diferentes puntos ensayados varia entre 400MPa y 750MPa asumiendo que el Macadam Hidráulico tendría mejores prestaciones en cuando al Modulo Resiliente que una Base Granular ( $M_r$  aprox. 315MPa),

A continuación, un ejemplo del esquema de entrada de datos el software BackVide:

Ilustración 41: Ejemplo de hoja de entrada de datos del Software BackVide 2018

**Programa BACVIDE - IMAE para modelización, diseño y verificación**  
**MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE DEFLEXIONES**

**Deflectometría** Eje de Ruedas Simples Frec. Hz 10,00 Medición Absoluta (FWD)

Absoluta (FWD)	radio de carga (mm)	150	presión (MPa)	0,697
	inter eje ruedas (mm)		trocha (mm)	
	carga del eje (kN)	99	Carga aplicada (kN)	49

**Retroajuste Simulación**

**Datos de la Deformada medida** Temperatura de ensayo °C 27,0

Distancia (mm)	0	200	300	450	600	900	1200		
Deflexión (mm/1000)	303	192	136	88	61	35	26		

Radio Curv (m) 103

**Estructura** Grado de fisuras 0

Tipo de Material	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Ecuación Mr			Relación Poisson	Interfaz	Año de construc.
			coef_A	coef_B	coef_C			
1 Acústica CA	6	2050				0,35	Adher	
3 Macadam Hidráulico	350	740				0,40	Adher	
3 Subrasante		308				0,40		

**Ensayos de Materiales** Toleranc 20%

Estimar Módulos	Parámetro	Módulo	Relación	Relación
	seleccionar	(MPa)	modular	sf Barker

**Criterios Retroajuste/Modelización**

Asignar Variables Modelización	Mod max (MPa)	Altura (mm)
A ajustar	10000	6
A ajustar	3500	350
A ajustar	4000	

Insertar Capa 1 Eliminar Capa

Una vez definido los datos de entrada, se ejecuta el programa BackVide buscando por medio de iteraciones del Módulo de la capa el cuenco de deflexión teórico que mejor replique o se aproxime al cuenco real calculado en los ensayos de deflectometría por el FWD.

Para calcular las deflexiones a diferentes profundidades y distancias se utiliza la ecuación de Boussinesq que es la siguiente:

$$w = \frac{(1 + \mu) * P}{2\pi * a^2 * Mr} * \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{(1 + 2 * \mu)}{a} * [((a^2 + z^2)^{0.5} - z)] \right\}$$

Esta ecuación permite la iteración del valor del Módulo (Mr) que nos permite obtener el valor teórico de la deflexión (w) generado por el valor semilla adoptado. El Módulo que genere un cuenco de deflexiones teóricas que mejor se aproxime al cuenco real de la deflexión es considerado como Módulo representativo del punto de análisis, para validar el valor de la deflexión teórica se calcula el Error con respecto al cuenco real mediante la siguiente ecuación:

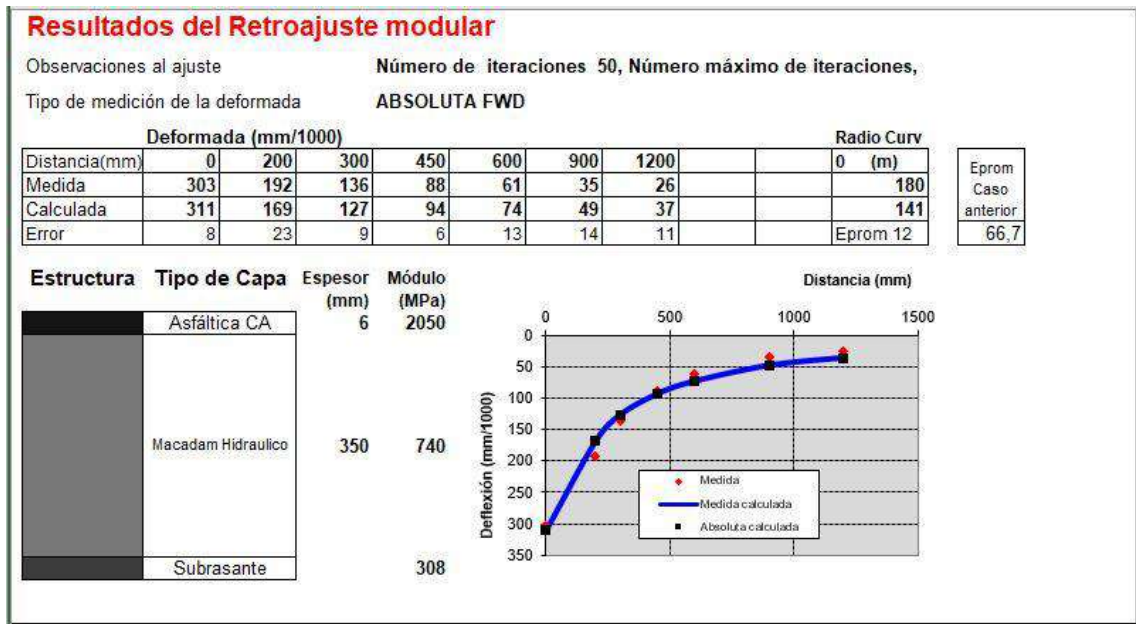
$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left( \frac{w_i^c - w_i^m}{w_i^m} \right)^2}$$

El cuenco de deflexiones se considera aceptable si el RMS es menor al 15% indicando resultados satisfactorios.

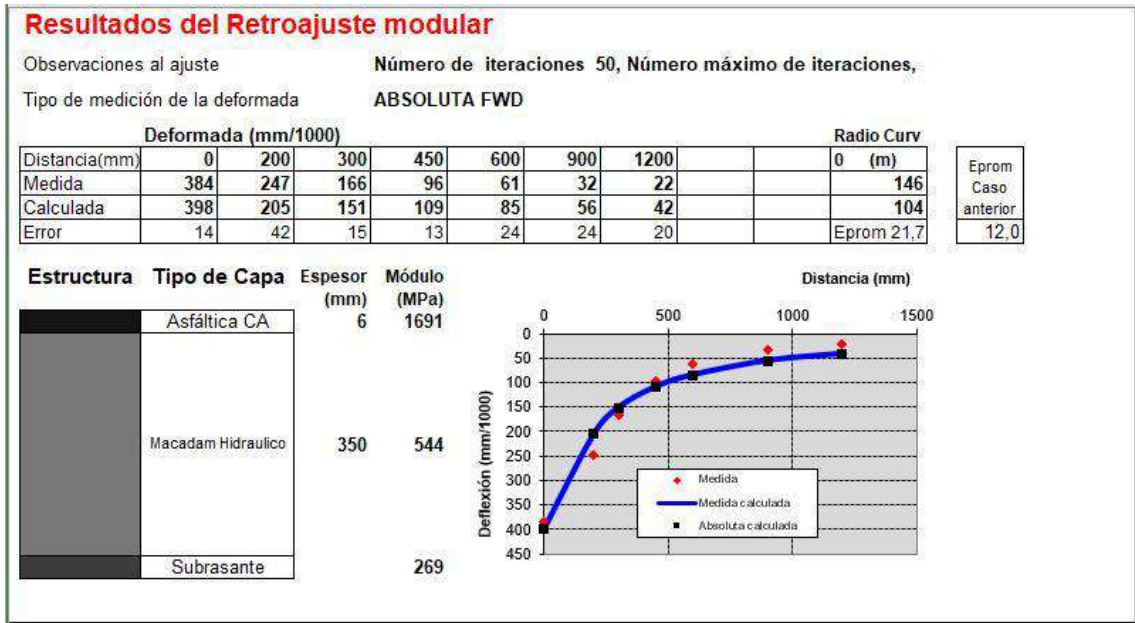
Este proceso iterativo fue realizado en todas las progresivas y los resultados se muestran a continuación.

Ascendente:

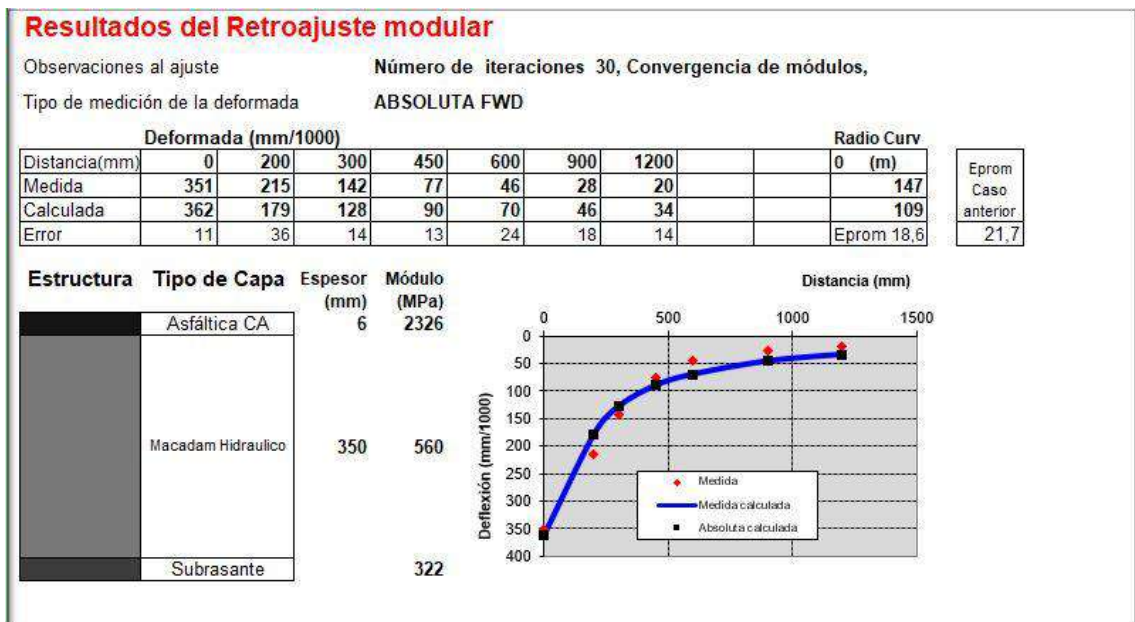
Progresiva 44+100



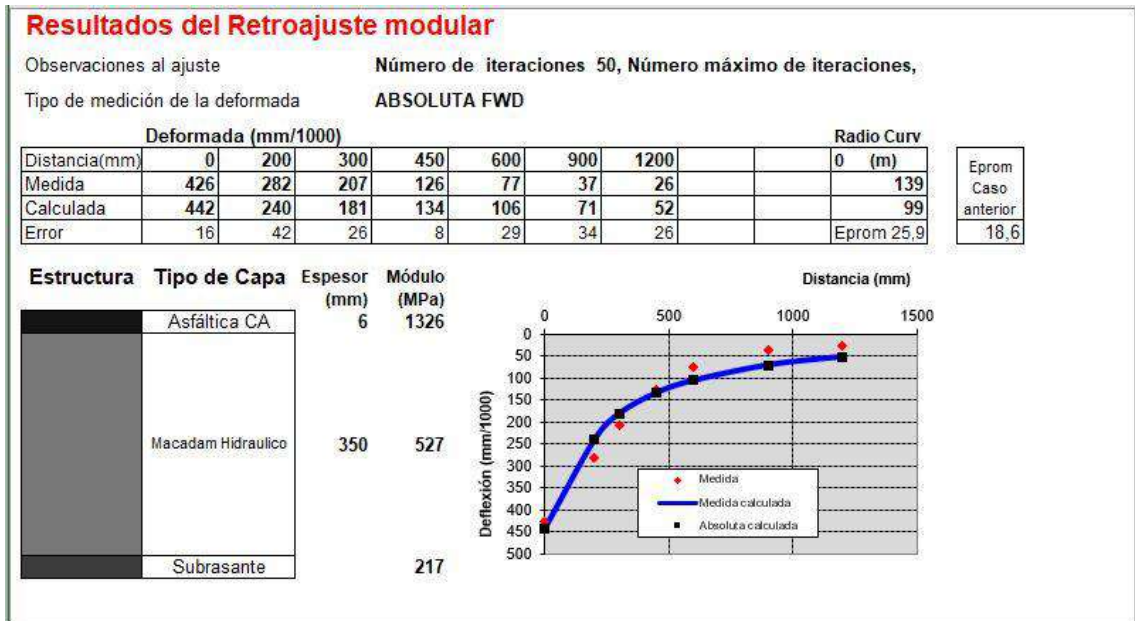
Progresiva 45+508



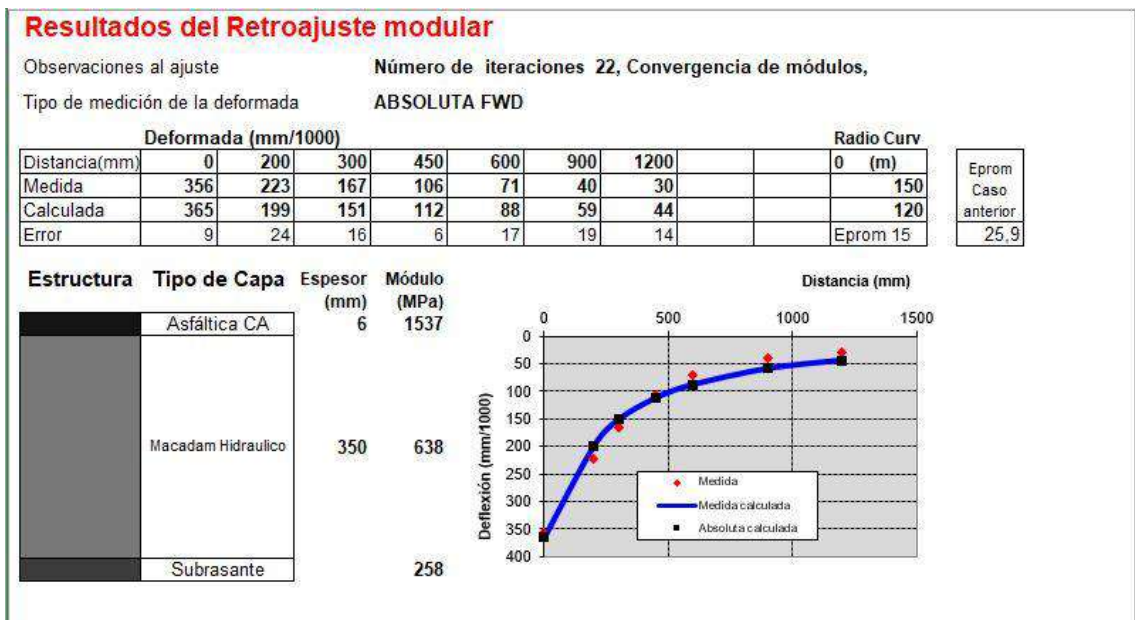
Progresiva 46+000



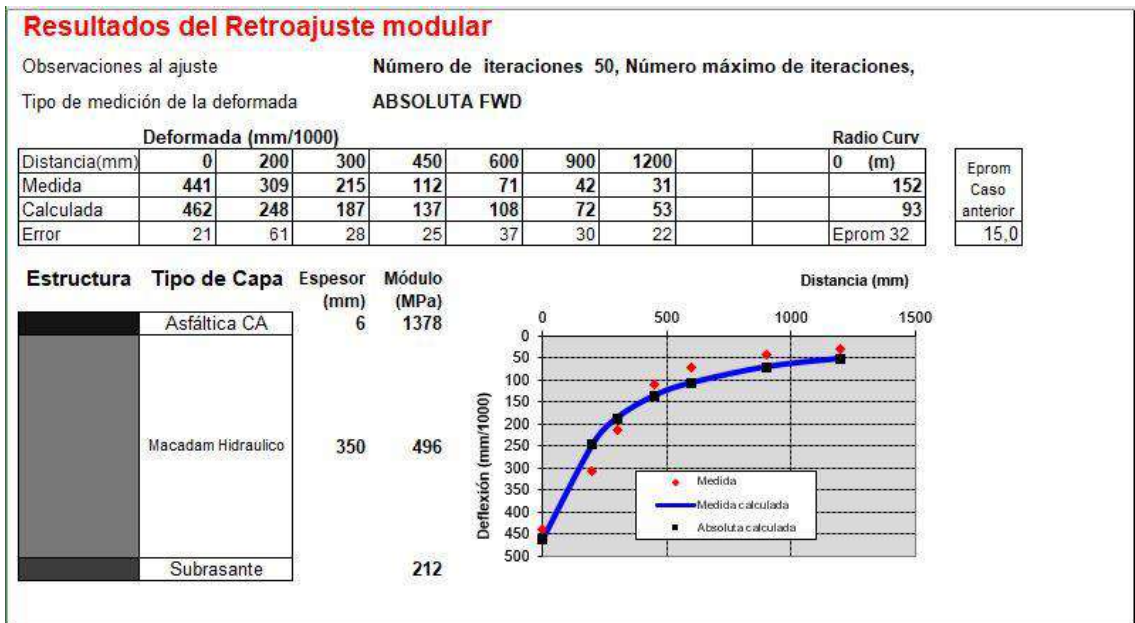
Progresiva 46+520



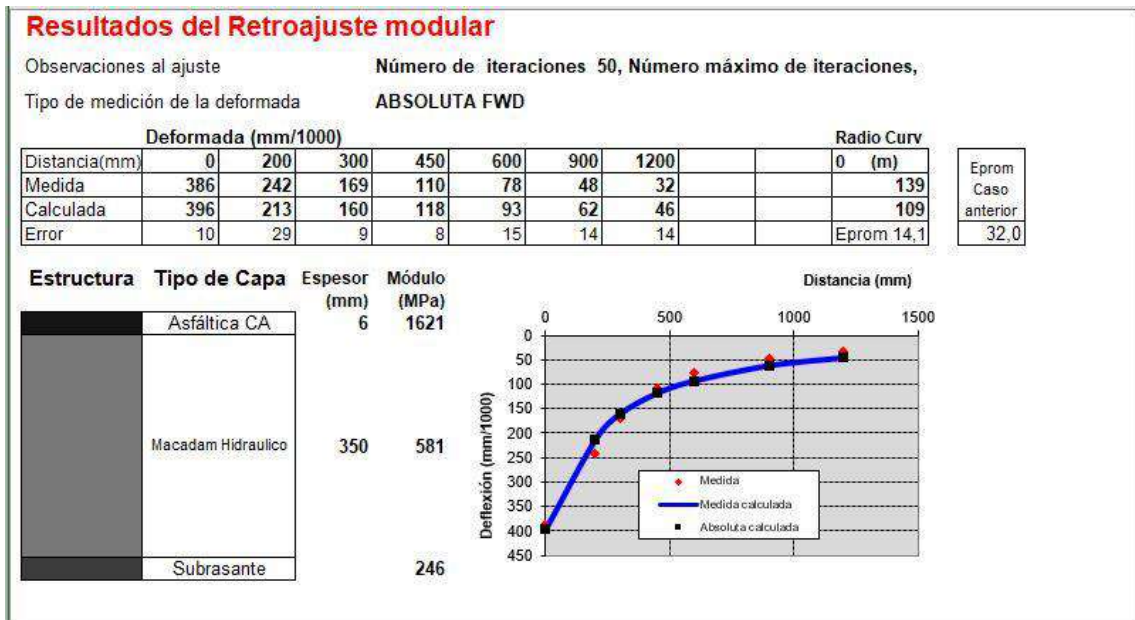
Progresiva 47+002



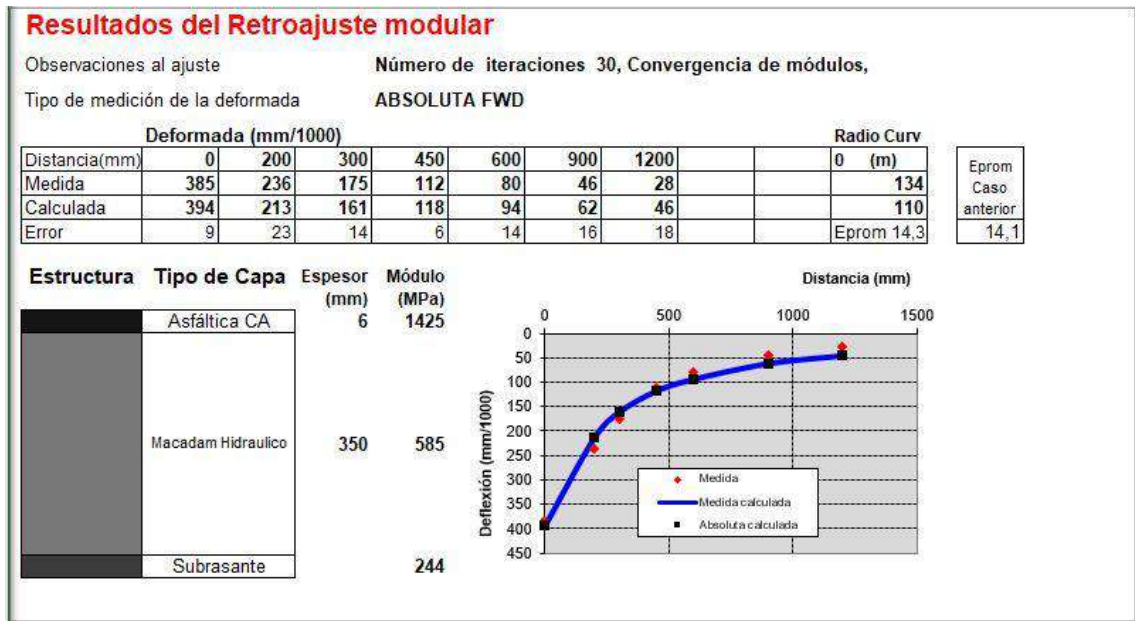
Progresiva 48+501



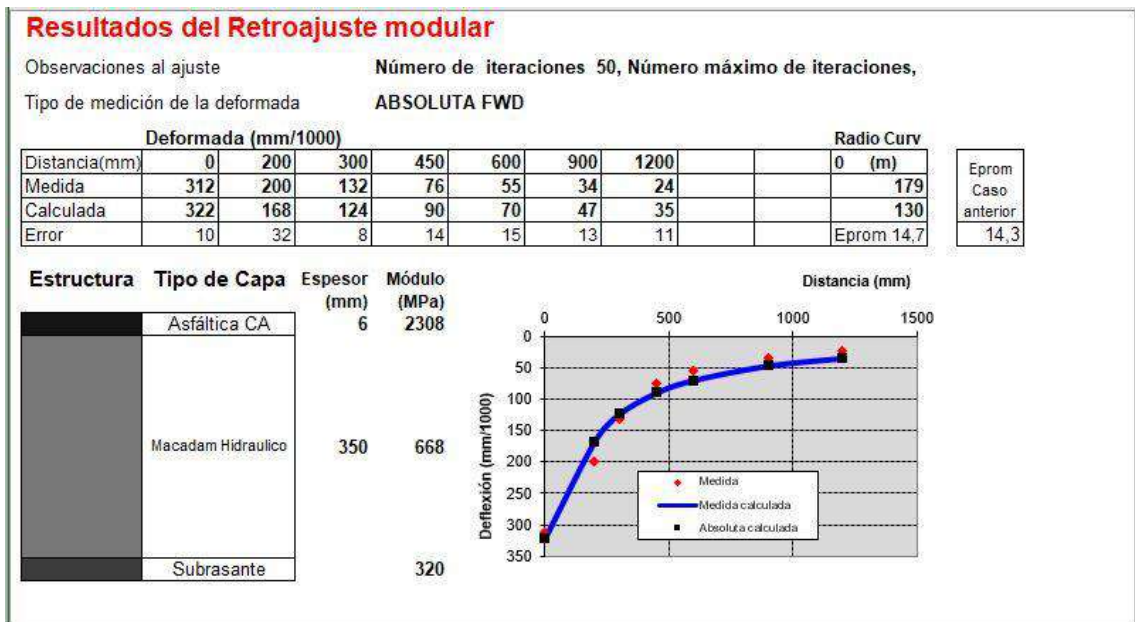
Progresiva 52+501



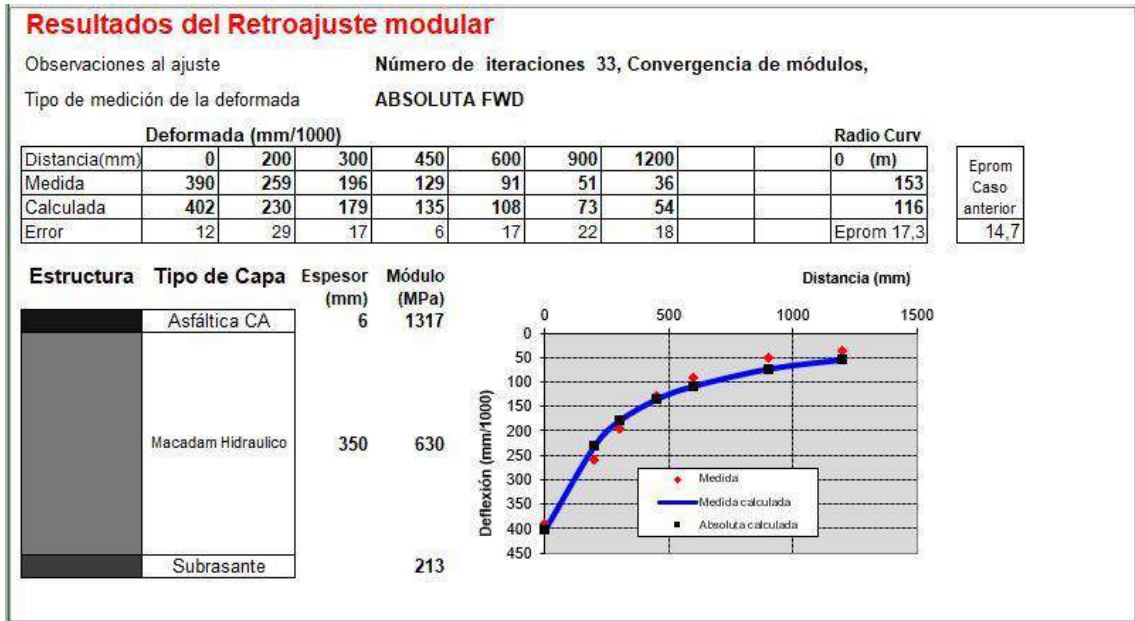
### Progresiva 53+004



### Progresiva 53+497

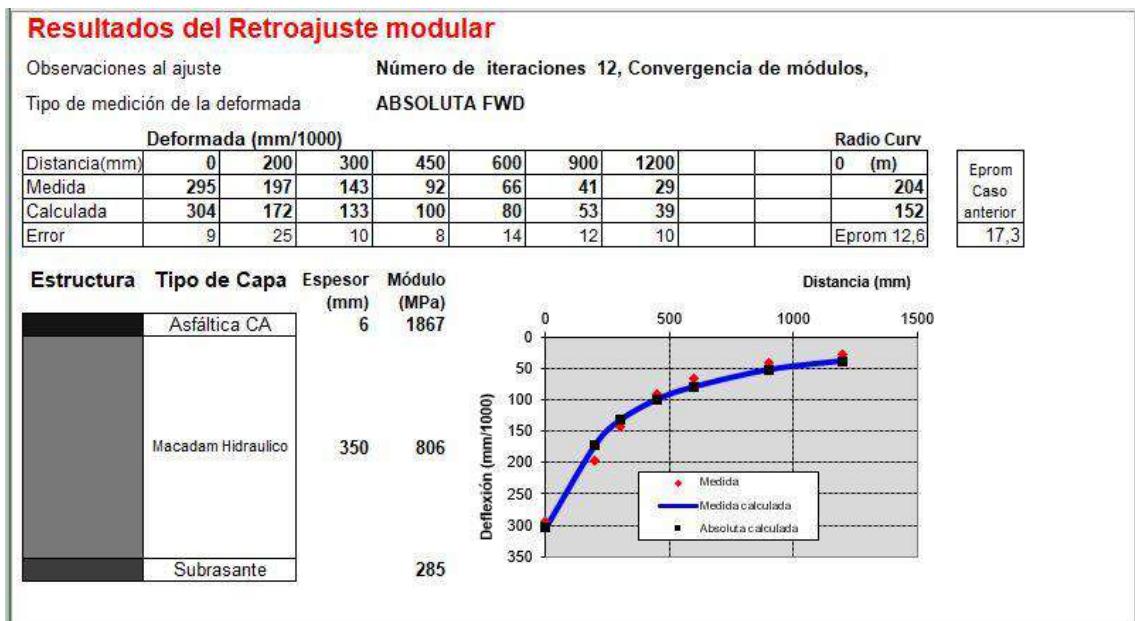


Progresiva 53+998

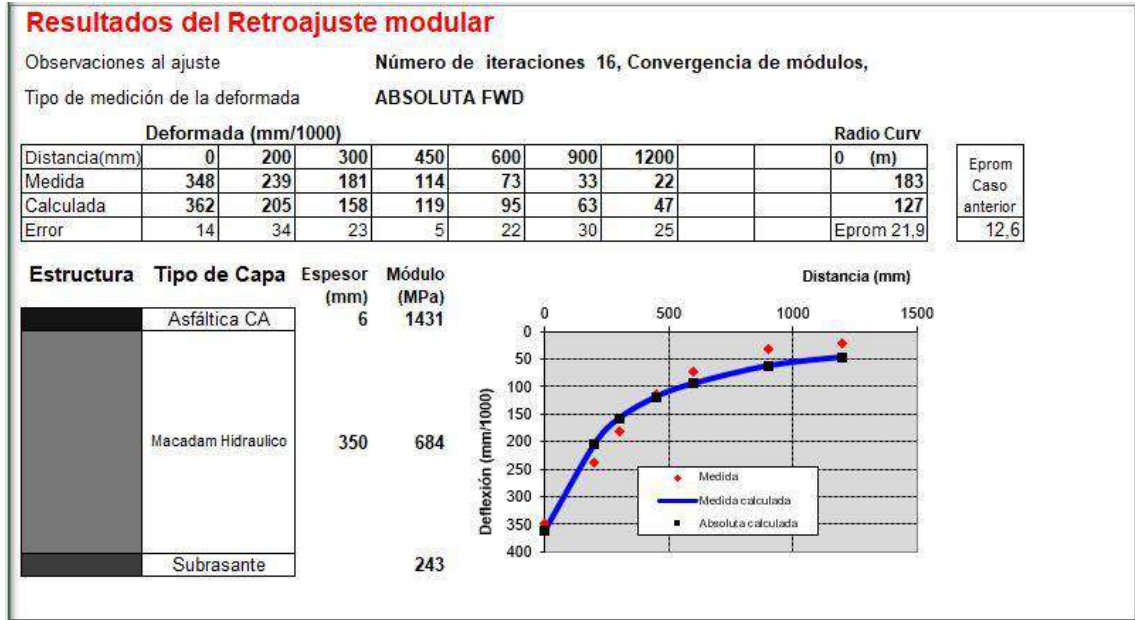


Descendente

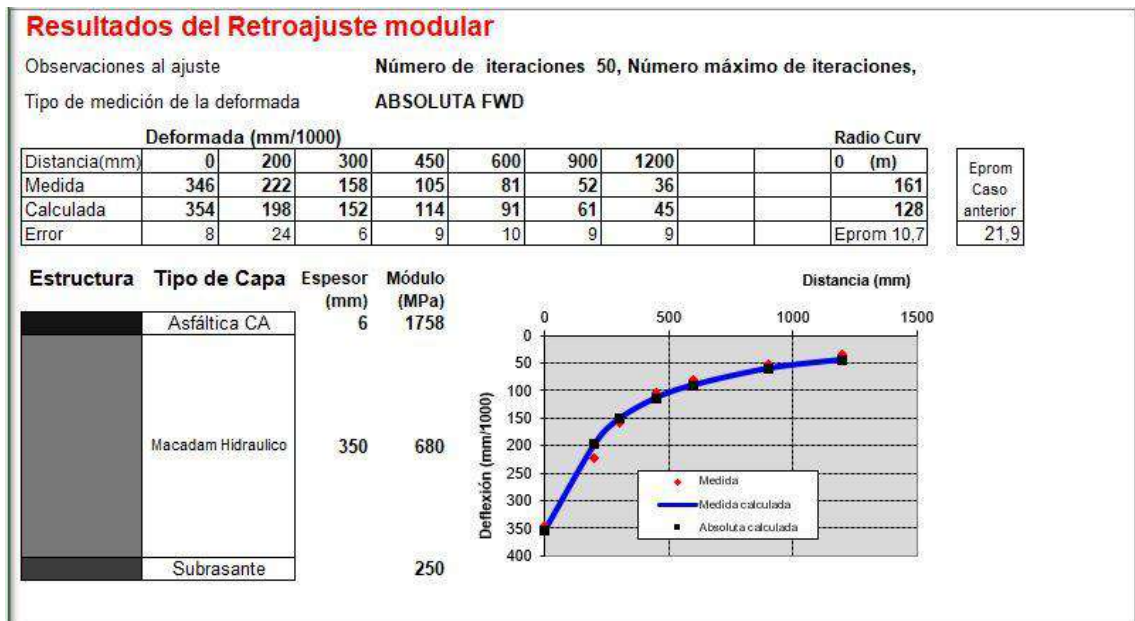
Progresiva 53+988



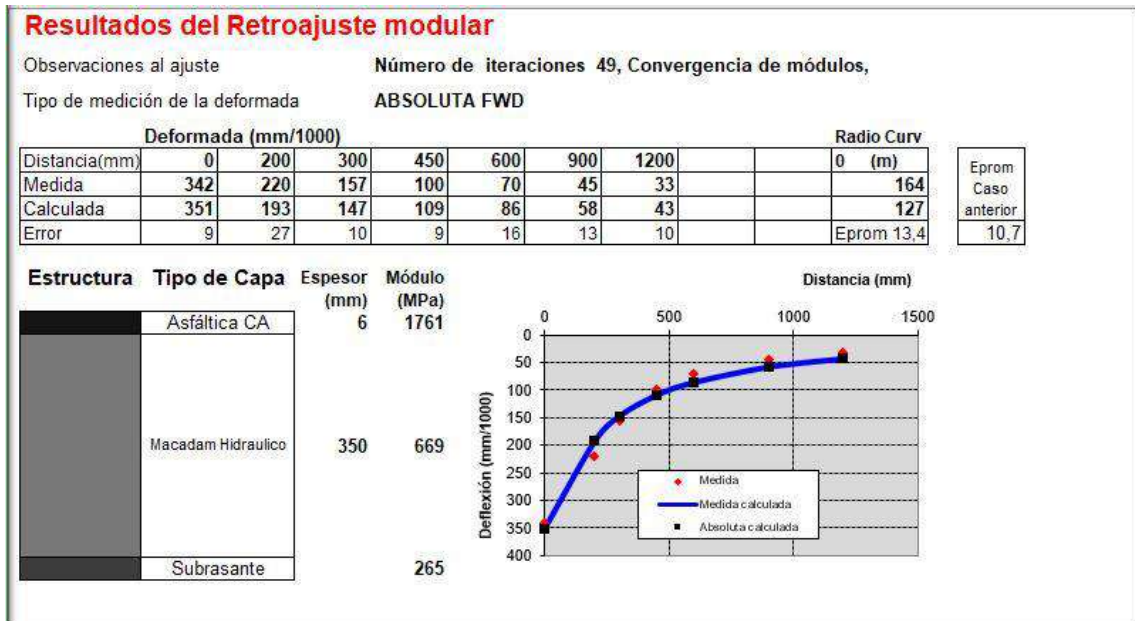
Progresiva 53+500



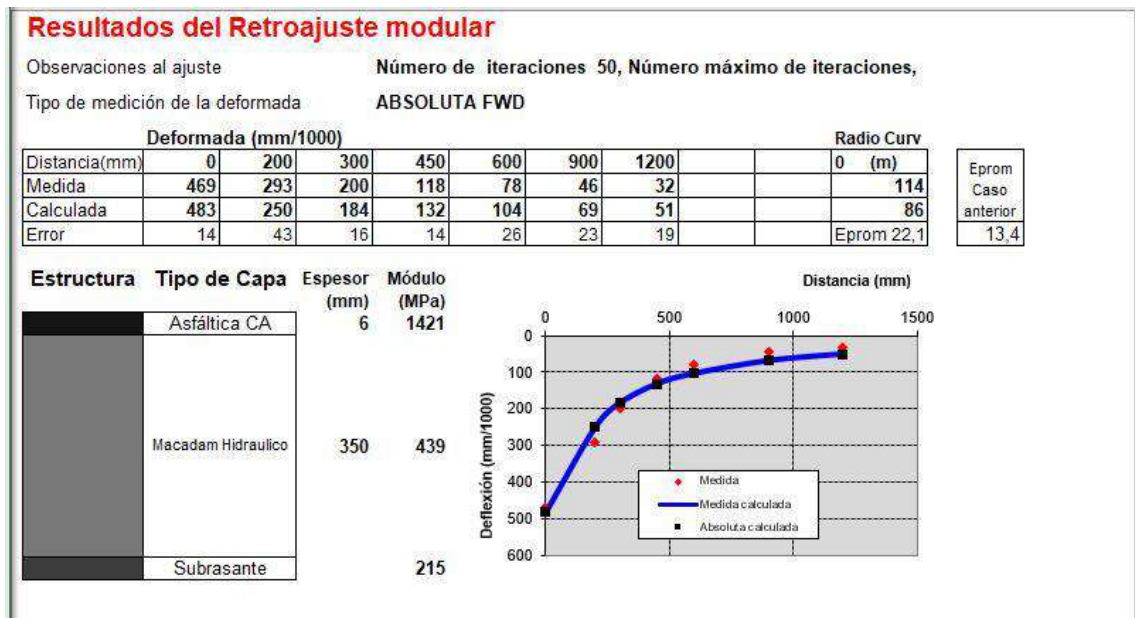
Progresiva 53+000



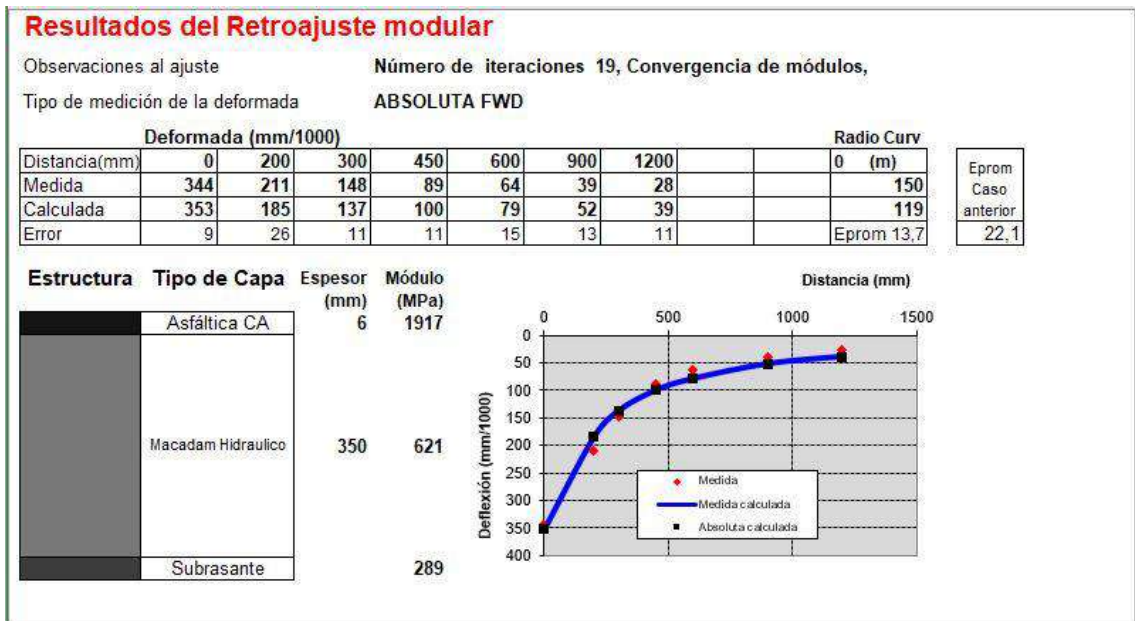
Progresiva 52+503



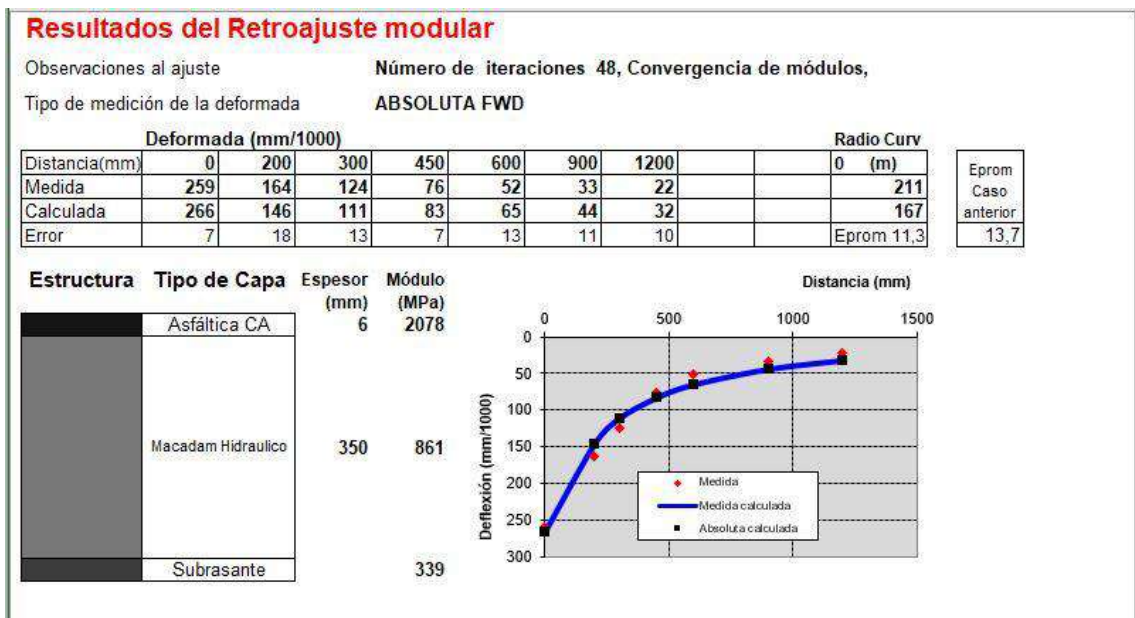
Progresiva 48+001



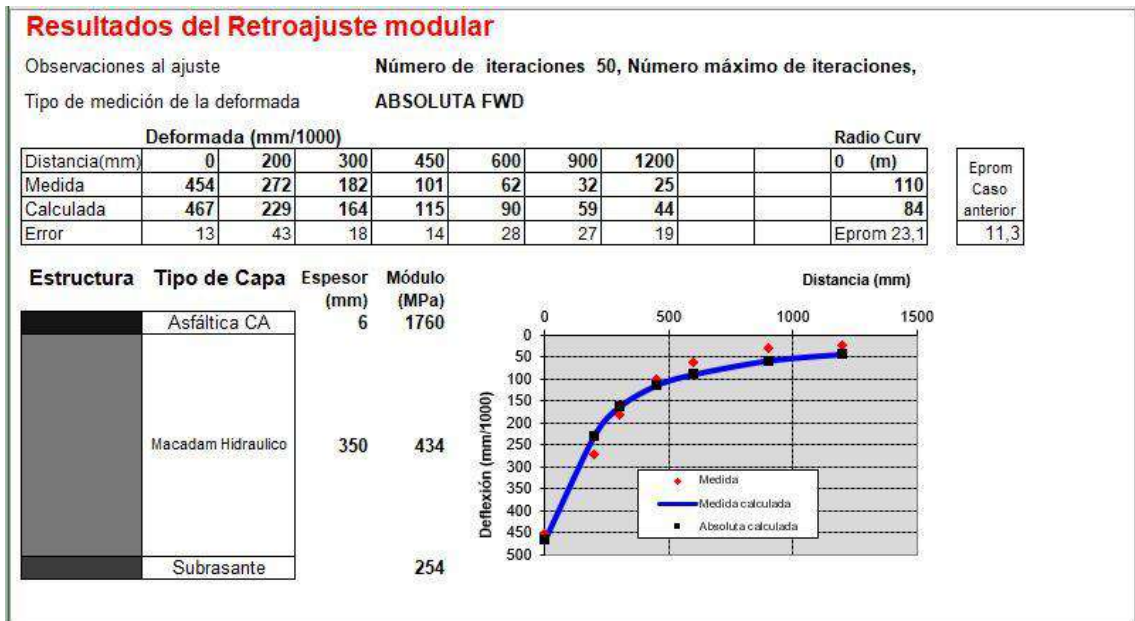
Progresiva 47+000



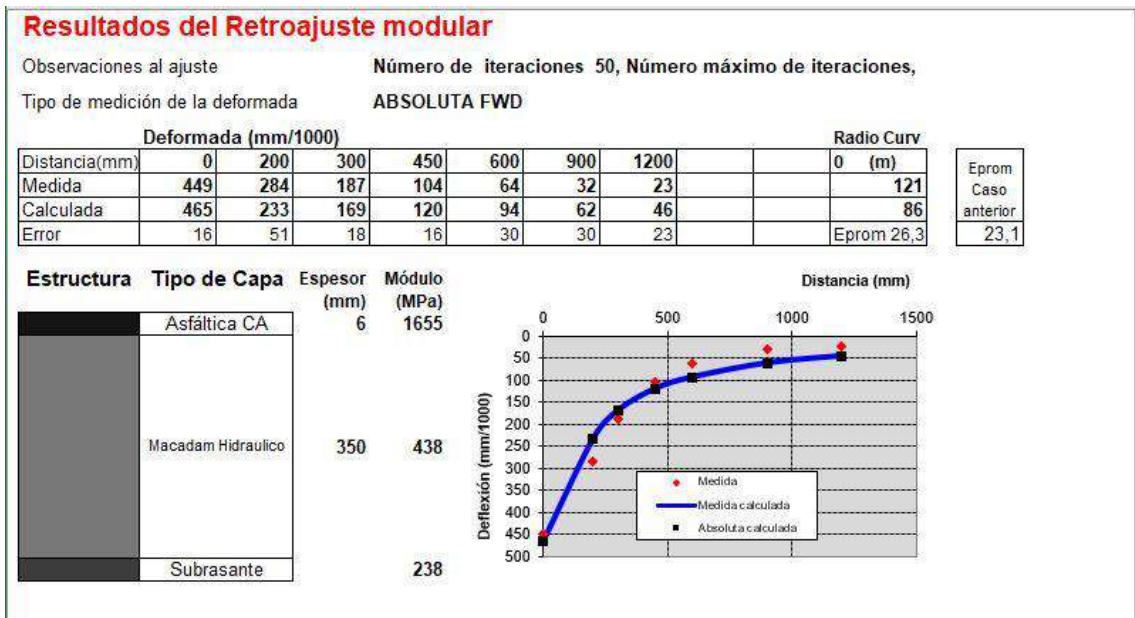
Progresiva 46+497



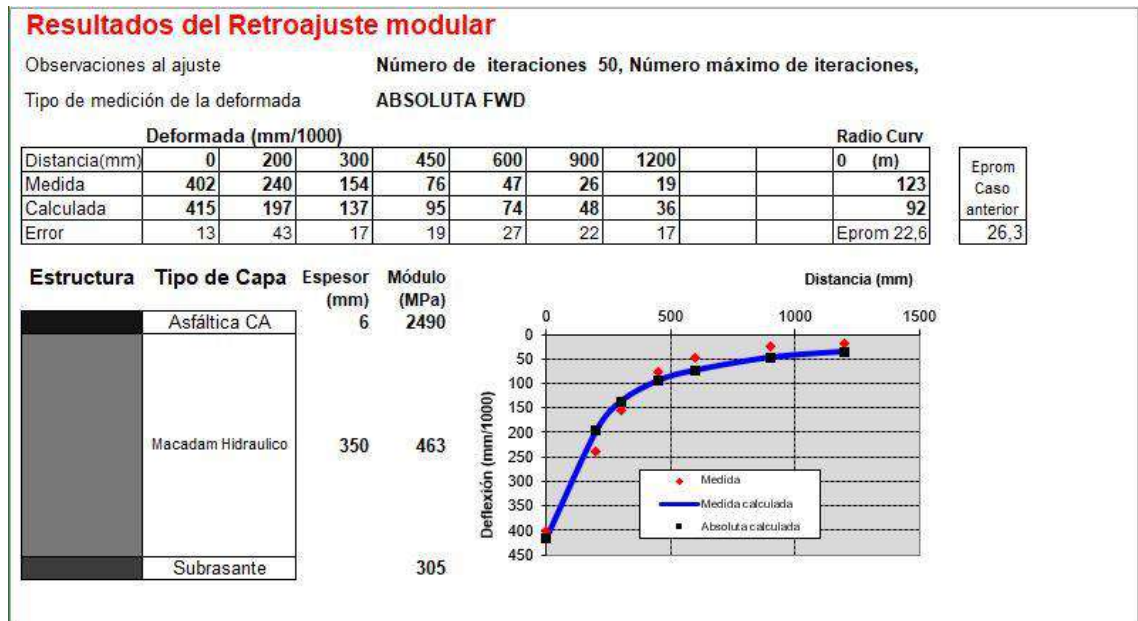
### Progresiva 46+010



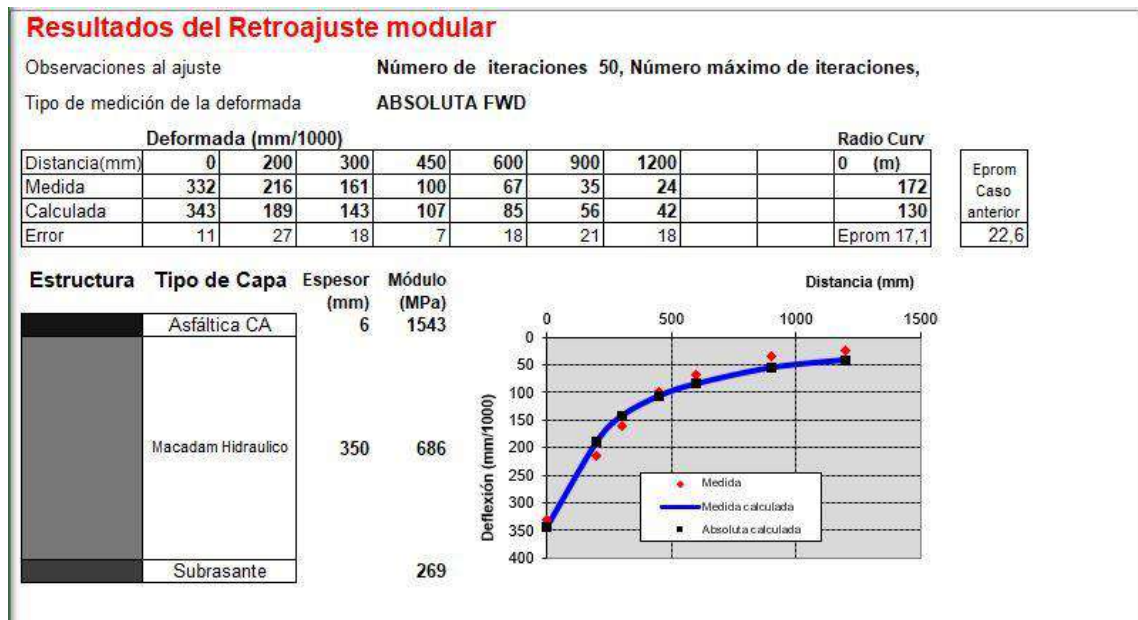
### Progresiva 45+500



### Progresiva 45+000



### Progresiva 44+496



## Progresiva 44+100

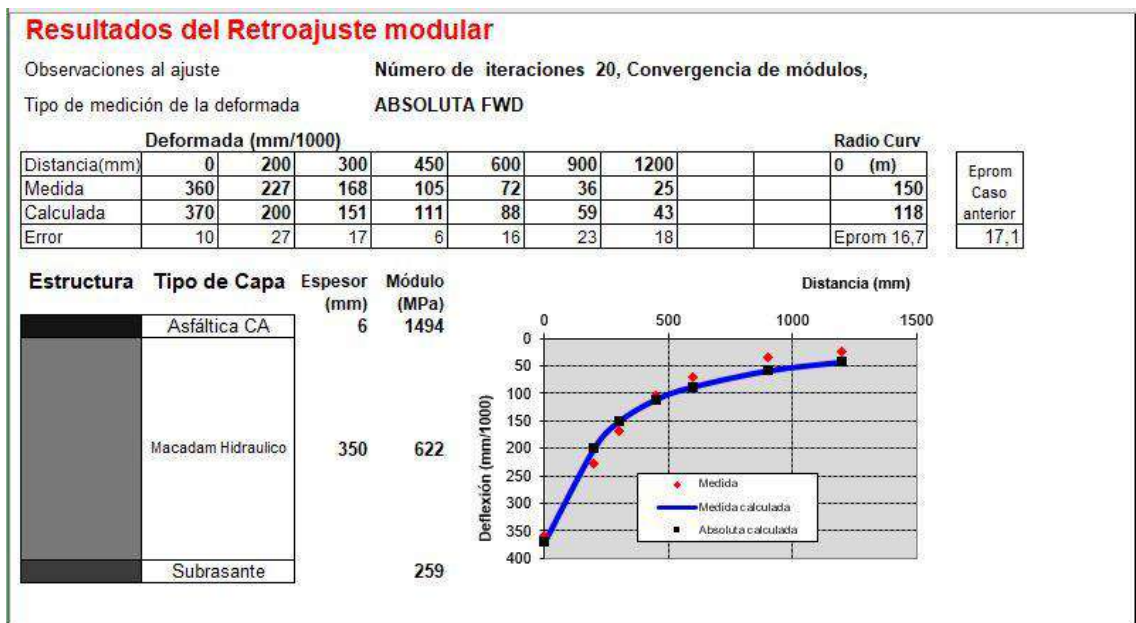


Tabla 26: Resumen de resultados de módulos por capa en MPa

ASCENDENTE						
PROGRESIVA	ESTACION	MACADAM HIDRAULICO		SUBRASANTE		MENOR A MAYOR
		Mr (MPa)	Mr (MPa)	ESTACION	Mr (MPa)	MENOR A MAYOR
44+100	1		740.00		308.00	10.00
45+508	4		544.00		269.00	6.00
46+000	5		560.00		322.00	4.00
46+520	6		527.00		217.00	5.00
47+002	7		638.00		258.00	18.00
48+501	10		496.00		212.00	19.00
52+501	18		581.00		246.00	21.00
53+004	19		585.00		244.00	7.00
53+497	20		668.00		320.00	20.00
53+998	21		630.00		213.00	1.00
DESCENDENTE						
PROGRESIVA	ESTACION	MACADAM HIDRAULICO		SUBRASANTE		MENOR A MAYOR
		Mr (MPa)	Mr (MPa)	ESTACION	Mr (MPa)	MENOR A MAYOR
53+988	1		806.00		285.00	17.00
53+500	2		684.00		243.00	18.00
53+000	3		680.00		250.00	13.00
52+503	4		669.00		265.00	19.00
48+001	13		439.00		215.00	15.00
47+000	15		621.00		289.00	21.00
46+497	16		861.00		339.00	4.00
46+010	17		434.00		254.00	3.00
45+500	18		438.00		238.00	2.00
45+000	19		463.00		305.00	20.00
44+496	20		686.00		269.00	1.00
44+100	21		622.00		259.00	16.00
ASCENDENTE			DESCENDENTE			
PROMEDIO	536.90		PROMEDIO	616.92		
MAXIMO	740.00		MAXIMO	861.00		
MINIMO	496.00		MINIMO	434.00		
DESV. ESTANDAR	72.98		DESV. ESTANDAR	145.27		
COEF. DE VARIACION	0.12		COEF. DE VARIACION	0.24		
PERCENTIL (20)	530.4		PERCENTIL(20)	438.6		

<b>VALOR APROXIMADO</b>	<b>484.5</b>	<b>MPa</b>
-------------------------	--------------	------------

En la tabla se observan los módulos de cada punto de ensayo realizado aproximadamente cada 500 metros correspondiente al tramo en estudio, se debe tener especial cuidado al considerar que la solución no es exacta ni única y requiere de varias iteraciones, para estimar un valor de Modulo representativo, para la capa base de Macadam Hidráulico se utilizó el promedio entre los percentiles 20 de los módulos cuyas mediciones fueron realizadas en dirección ascendente y descendente, que nos da una confiabilidad del 80%. De acuerdo con los resultados arriba expuestos se visualizan módulos muy elevados de la capa base de Macadam Hidráulico en todo el tramo con respecto a otro tipo de bases ya sean granulares, lo que nos lanza un valor aproximado de 485 MPa.

## CAPITULO 6

### VERIFICACION DEL PAQUETE ESTRUCTURAL

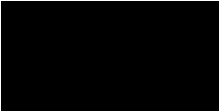



#### Normativa de Diseño utilizada:

El desarrollo de los modelos de diseño y verificación encarado en el presente trabajo para el paquete estructural, será realizado en base a la metodología de diseño indicada por la **Guía de Diseño de Pavimentos de la AASHTO en su versión año 1993**, permiten determinar las propiedades estructurales de las capas del pavimento para soportar las solicitaciones a las que estará sometida.

#### Verificación de la documentación existente:

La información proveída por la empresa Constructora muestra que el proyecto configura un paquete de firmes que orienta a un sistema multicapas con pavimento flexible, donde cada una de ellas está constituida por materiales cuya características y condiciones se describen en el capítulo 4.

Se cuentan con tres capas claramente definidas, la capa de rodadura carpeta de concreto asfáltico, la capa base de macadam hidráulico, la subrasante mejorada.

	e=6 cm; a1=?	Capa de rodadura: Carpeta de Concreto Asfáltico; a1=?
	e=35 cm; a2=?	Capa Base: Macadam Hidráulico; a2= ? Mr = 484.5 MPa
	e=15cm; a3=?	Capa subbase: Mejoramiento de la subrasante, material A-4, CBR = 21.3 %
		Suelo: CBR = 7% Mr =?.

#### Confiabilidad:

Tabla 27: Valores de Confiabilidad recomendada. Fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad (R) recomendado	
	Urbana	Rural
Interestatales y vías rápidas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

En el presente trabajo se adopta una Confiabilidad  $R_T = 95\%$ , la cual se encuentra dentro de los rangos recomendados por la AASTHO para la categoría del tamo, considerando como camino tipo colectoras en zona rural, con consideraciones que no son temerarias.

#### Desviación Standard:

Tabla 28: Valores de Desviación Estándar ( $S_o$ ). Fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.

Variación en la predicción del comportamiento del pavimento	Desvío estándar ( $S_o$ )	
	Pavimentos Rígidos	Pavimentos Flexibles
Sin errores en el tránsito	0,34	0,44
Con errores en el tránsito	0,39	0,49

#### Serviciabilidad:

Para definir este parámetro seguiremos la línea de recomendación de la metodología de diseño de la AASHTO que indica un índice de 2,5 para carreteras principales y un valor de 2,0 para carreteras con bajo nivel de tráfico. Los siguientes constituyen una guía para mínimos valores de  $p_t$  obtenidos de estudios relacionados con la AASHO Road Test.

Tabla 29: Valores de pérdida de serviciabilidad  $P_t$  recomendados. Fuente de consulta de la especialidad Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93

<b>Terminal Serviceability Level</b>	<b>Percent of People Stating Unacceptable</b>
3.0	12
2.5	55
2.0	85

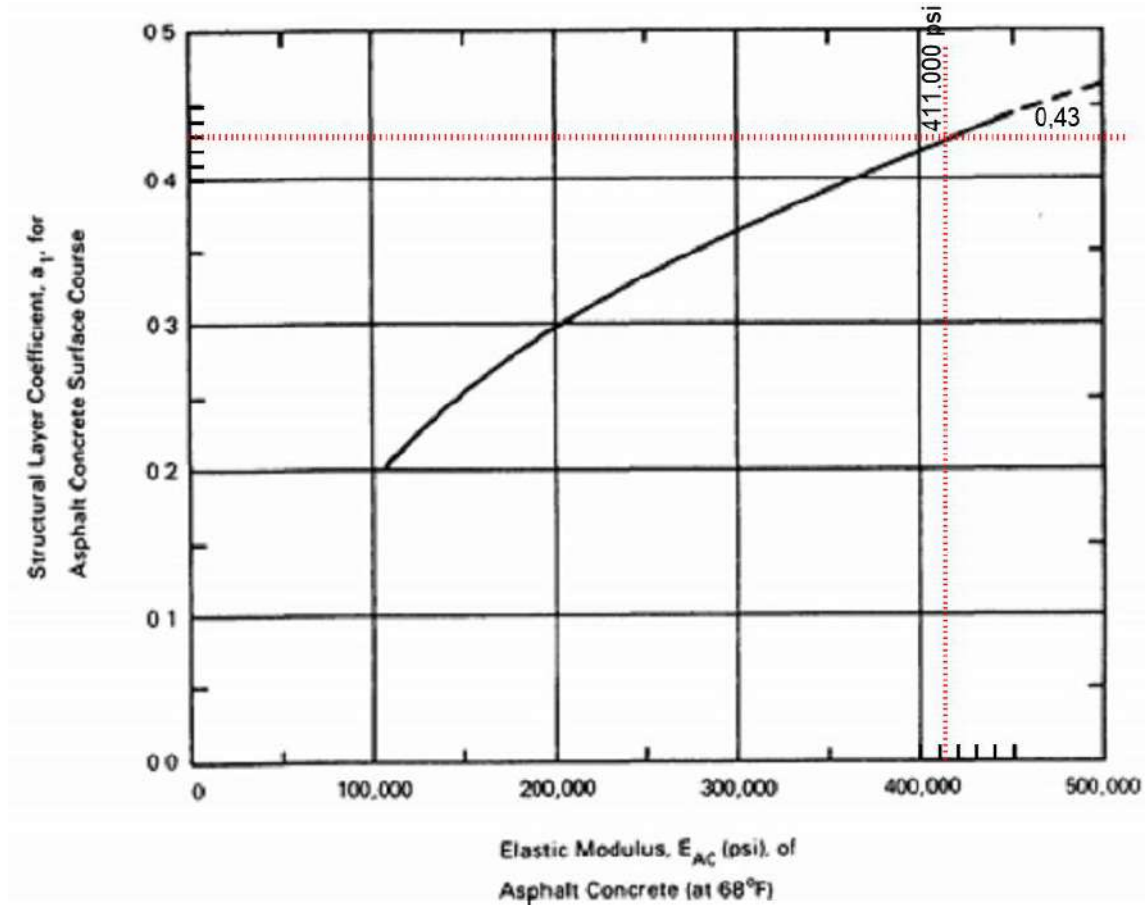
Para el trabajo se adopta un PSI inicial = 4,2 y un PSI final = 2,0 por lo que  $\Delta$  PSI = 2,2.

#### **Determinación del Coeficiente estructural de capa:**

La determinación del número estructural está sujeta al conocimiento de los coeficientes estructurales de las capas, las mismas se describen a continuación:

- Capa de rodadura: Constituida con concreto asfáltico, diseñado para tráfico pesado. La caracterización estructural de esta capa está representada en el Método AASHTO 1993, por el coeficiente de aporte estructural  $a_1 = 0,43$ , el cual corresponde a un material con un módulo elástico de 411.000 psi.

Ilustración 42: Valores de Módulos vs Coeficientes estructurales para carpeta asfáltica



- Capa base: Esta constituida de macadam hidráulico y debido a la falta de información para determinar el coeficiente estructural para dicho material, en este proyecto de investigación se lleva a cabo una analogía mediante el empleo de una ecuación matemática mencionada en la AASHTO 93 correspondiente a bases granulares, la cual expresa valores de coeficientes estructurales con respecto a valores de módulos y estimar una aproximación del comportamiento estructural para dicha capa, que se expresa a continuación.

$$a_2 = 0.249 (\log_{10} * E_{BS}) - 0.977$$

Con esta ecuación y el Módulo determinado en el capítulo anterior 484.5 MPa (70.270 psi) se puede conocer en función a la analogía realizada con materiales granulares un valor estimativo de coeficiente estructural.

$$a_2 = 0.249 (\log_{10} * 70.270) - 0.977$$

$$a_2 = 0.22$$

- Capa de Subrasante mejorada: Esta construida con material A-4 estabilizado, así también como la base para determinar el coeficiente estructural para la capa, se lleva a cabo una analogía a fin estimar el comportamiento estructural de este material y conocer sus prestaciones, mediante el empleo de una ecuación matemática mencionada en la AASHTO 93 correspondiente a Subbase la cual expresa valores de coeficientes estructurales con respecto a valores de módulos y estimar una aproximación del número estructural (SN) para dicha capa, que se expresa a continuación.

$$a_3 = 0.227 (\log_{10} * E_{SB}) - 0.839$$

#### **Determinación del módulo de la subrasante Mejorada:**

En el método AASHTO (1986 y 1993), el Módulo Resiliente MR (ensayo AASHTO T 294-92), reemplaza al CBR como variable para caracterizar la subrasante, la subbase y la base. El Módulo Resiliente de un suelo o de un material granular no es un valor constante representativo de dichos suelos o materiales, sino que es dependiente del estado de tensiones al cual está sometido de conformidad con la carga solicitante y la posición del mismo en la estructura del pavimento. Por otra parte, las variaciones de humedad que puedan afectar al material, también determinan el valor del Módulo a ser asignado al mismo.

En este método deben utilizarse los valores medios resultantes de los ensayos de laboratorio, dado que las incertidumbres son tenidas en cuenta en la Confiabilidad RT.

Para los casos en que no se disponga de valores de MR, AASHTO admite la correlación con distintos ensayos como ser: Índice de grupo, CBR, etc.

En el presente estudio, es utilizada la siguiente ecuación de correlación.

$$M_R = 22,1 \cdot \text{CBR}^{0,55} ; \text{MR en MPa, CBR en \% y } 12 < \text{CBR} < 80$$

$$M_R = 22,1 \cdot (21,3)^{0,55}$$

$$M_R = 118,85 \text{ MPa} = 17.237 \text{ psi}$$

Con esta ecuación y el Módulo determinado 118.85 MPa (17.237 psi) se puede conocer un valor estimativo de coeficiente estructural.

$$a_3 = 0.227 (\log_{10} * 17.237) - 0.839$$

$$a_3 = 0.12$$

	e=6 cm; a1=0.43	Capa de rodadura: Carpeta de Concreto Asfáltico; a1=0,43 Mr = 411.000 psi
	e=35 cm; a2=0.22	Capa Base: Macadam Hidráulico; a2= 0,23 Mr = 484.5 MPa, (70.270 psi)
	e=15 cm; a2=0.12	Subrasante: Mejoramiento de la subrasante, material A-4 Mr = 118.85 MPa, (17.237 psi)
		Suelo: CBR = 7% Mr = 59.06 MPa, (8566 psi)

Conocidas las capas que forman parte del paquete de firmes pasaremos a calcular el valor del Numero estructural que ofrece el sistema multicapas y a partir de ese dato estimar cuantos ejes equivalentes ha de atender el paquete de firmes por metodología AASHTO 1993.

De la ecuación de la definición de Numero estructural calculamos el valor de SN, que resulta de las capas que forman parte del proyecto.

$$SN = a_1 * e_1 + a_2 * e_2 * m_2 + a_3 * e_3 * m_3$$

Aplicando las variables mencionadas a la ecuación se obtiene:

$SN = 0.43 * 2.36pulg + 0.22 * 13.78pulg * 1 + 0.12 * 5.90pulg * 1$   
se obtiene que:

$$SN = 4.75$$

### **Verificación de Diseño por el Método AASHTO 93**

Para efectuar la aplicación de la Formula de la Guía de pavimentos de la AASHTO 93, utilizamos la herramienta disponible en línea EqAASHTO93 desarrollada por el Ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela de la Universidad Nacional de Colombia.

#### **ECUACIONES AASHTO 1993 – EqAASHTO93 ver 2.0**

CONCEPCIÓN Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN  
Octubre de 2000 – Enero de 2004.

Por:

Luis Ricardo Vásquez Varela  
Ingeniero Civil. Especialista en Vías y Transporte.  
Universidad Nacional de Colombia.

#### **INTRODUCCIÓN**

EqAASHTO93 es un programa desarrollado en Visual Basic 6.0 para Windows. Su objetivo primordial es resolver las ecuaciones de la Guía AASHTO de Diseño de Pavimentos de 1993 para el dimensionamiento de pavimentos flexibles y rígidos.

Aplicando los valores obtenidos para las diferentes variables se ilustra abajo la Figura 14 con el resultado de los ejes equivalentes (ESAL'S - W18) tenidos para la falla del sistema multicapas:

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

### Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)

Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:  Flexible  Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 95 %  $Z_r = -1.645$  So: 0.49

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial: 4.2  PSI final: 2

Tránsito de diseño: W18

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coefficiente de capa (ai)	Coefficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto	
1	<input type="text"/>	<input type="text" value="¿E/a?"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="¿m?"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Diseñar"/>
2	<input type="text"/>	<input type="text" value="¿E/a?"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="¿m?"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Ver informe"/>
3	<input type="text"/>	<input type="text" value="¿E/a?"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="¿m?"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
4	8566	<input type="text" value="MR"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	W18 real <input type="text"/>





SN:  W18:

Quitar el control de variables

*Ventana gráfica con el valor de Ejes Equivalentes W18 (ESAL'S) de diseño. Obtenido de la Fuente de consulta de la especialidad EqAASHTO93, basado en la Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.*

Como resultado de salida del software, obtenemos una verificación en base a los parámetros obtenidos que indican un número estructural **SN=4.75** (en pulgadas), que atiende un tráfico solicitante W18 de **9.750.000 ESAL's**. para la estructura verificada

### Paquete de firmes verificado - Método AASHTO 93.

	$e=6$ cm; $a_1=0.43$	Capa de rodadura: Carpeta de Concreto Asfáltico; $a_1=0,43$ $M_r = 411.000$ psi
	$e=35$ cm; $a_2=0.22$	Capa Base: Macadam Hidráulico; $a_2= 0,23$ $M_r = 484.5$ MPa, (70.270 psi)
	$e=15$ cm; $a_2=0.12$	Subrasante: Mejoramiento de la subrasante, material A-4 $M_r = 118.85$ MPa, (17.237 psi)
		Suelo: CBR = 7% $M_r = 59.06$ MPa, (8566 psi)

$SN = 4.75$  (en Pulgadas)

$W_{18} = 9.750.000$  EE

## CAPITULO 7

### COMPARACION DEL MACADAM HIDRAULICO RESPECTO A BASES GRANULARES

#### NUMERO ESTRUCTURAL:

##### Macadam Hidráulico:

Debido a la falta de información para determinar el coeficiente estructural para dicho material, en este proyecto de investigación se lleva a cabo una analogía mediante el empleo de una ecuación matemática mencionada en la AASHTO 93, la cual expresa valores de coeficientes estructurales con respecto a valores de módulos que permita estimar una aproximación del comportamiento estructural para dicha capa, que se expresa a continuación.

$$a_2 = 0.249 (\log_{10} * E_{BS}) - 0.977$$

Con esta ecuación y el Módulo determinado en el **capítulo 5**, 484.5 MPa (70.270 psi) se puede conocer en función a la analogía realizada un valor estimativo de coeficiente estructural.

$$a_2 = 0.249 (\log_{10} * 70.270) - 0.977$$

$$a_2 = 0.22$$

Con el Coeficiente Estructural estimado podemos definir el valor del número estructural para la capa base de Macadam Hidráulico.

$$SN_{(MH)} = a_{2(MH)} * e_{2(MH)}$$

Con esta ecuación se obtiene:

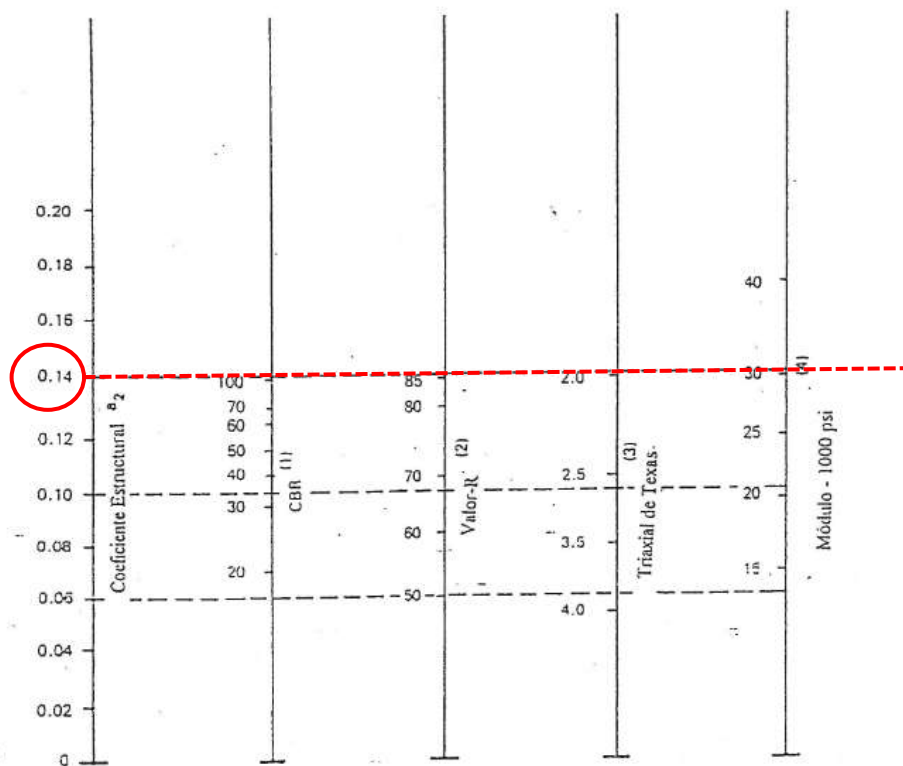
$$SN_{(MH)} = 0.22 * 13.78 \text{pulg}$$

$$SN_{(MH)} = 3.03$$

### Base Granular:

Para una base granular estabilizada BGE (90-10), la recomendación de la Guía AASTHO en su versión 1993 orienta a un módulo de 30.000psi para este material, con esta consideración podemos determinar el coeficiente estructural de la BGE mediante la siguiente grafica que relaciona el coeficiente estructural con diferentes parámetros de resistencia.

Ilustración 43: Variación del Coeficiente Estructural de la capa base granular con diferentes parámetros de resistencia



Entonces para un  $M_r = 30.000$  psi, el coeficiente estructural es:

$$a_2 = 0.14$$

Con el Coeficiente Estructural estimado podemos definir el valor del número estructural para la capa de Base Granular Estabilizada (90-10).

$$SN_{(BGE)} = a_{2(BGE)} * e_{2(BGE)}$$

Con esta ecuación se obtiene:

$$SN_{(BGE)} = 0.14 * 13.78pulg$$

$$SN_{(BGE)} = 1.93$$

### **EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES (ESAL'S):**

#### **Macadam Hidráulico:**

Conociendo los valores de los coeficientes estructurales de cada una de las capas del paquete de firmes se calcula el valor del Numero Estructural SN que ofrece el sistema multicapas y a partir de ese dato estimar cuantos ejes equivalentes ha de atender la estructura del pavimento por metodología AASHTO 1993.

De la ecuación de la definición de Numero estructural calculamos el valor de SN, que resulta de las capas que forman parte del proyecto.

$$SN = a1 * e1 + a2 * e2 * m_2 + a3 * e3 * m_3$$

Aplicando las variables mencionadas a la ecuación se obtiene:

$$SN = 0.43 * 2.36pulg + 0.22 * 13.78pulg * 1 + 0.12 * 5.90pulg * 1$$

se obtiene que:

$$SN = 4.75$$

### **Verificación de Diseño por el Método AASHTO 93**

Para efectuar la aplicación de la Formula de la Guía de pavimentos de la AASHTO 93, utilizamos la herramienta disponible en línea EqAASHTO93 desarrollada por el Ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela de la Universidad Nacional de Colombia.

## ECUACIONES AASHTO 1993 – EqAASHTO93 ver 2.0

CONCEPCIÓN Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN  
Octubre de 2000 – Enero de 2004.

Por:

Luis Ricardo Vásquez Varela  
Ingeniero Civil. Especialista en Vías y Transporte.  
Universidad Nacional de Colombia.

### INTRODUCCIÓN

EqAASHTO93 es un programa desarrollado en Visual Basic 6.0 para Windows. Su objetivo primordial es resolver las ecuaciones de la Guía AASHTO de Diseño de Pavimentos de 1993 para el dimensionamiento de pavimentos flexibles y rígidos.

Con los valores obtenidos para las diferentes variables se ilustra abajo la Figura 14 con el resultado de los ejes equivalentes (ESAL'S - W18) tenidos para la falla del sistema multicapas:

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)

Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:  
 Flexible  
 Rígido

Confianza (R) y desviación estándar (So):  
95% Zr = -1.645  
So = 0.49

Serviciabilidades inicial y final:  
PSI inicial = 4.2  
PSI final = 2

Tránsito de diseño:  
W18

Pavimento flexible

Capa	Módulo de elasticidad (psi)	Coeficiente de capa (ai)	Coeficiente de drenaje (mi)	SN necesario	Espesor D (plg.)	Espesor D* (plg.)	SN* dispuesto
1		¿E/a?		¿m?			
2		¿E/a?		¿m?			
3		¿E/a?		¿m?			
4	8566	MR					

Cálculo de W18 para un SN  
SN = 4.75    W18 = 9.75E+006

Quitar el control de variables

Diseñar    Ver informe    Salir

*Ventana gráfica con el valor de Ejes Equivalentes W18 (ESAL'S) de diseño. Obtenido de la Fuente de consulta de la especialidad EqAASHTO93, basado en la Guía de Diseño de Pavimentos de AASHTO 93.*

Como resultado de salida del software, obtenemos una verificación en base a los parámetros obtenidos que indican un número estructural **SN=4.75** (en pulgadas), que atiende un tráfico solicitante W18 de **9.750.000 ESAL's**. para la estructura verificada

### Base Granular:

De la misma forma que con la Base de Macadam Hidráulico, ya determinado el coeficiente estructural de la BGE y conociendo los coeficientes estructurales de todas las capas que componen el paquete, a continuación, se calcula el Numero Estructural del firme con BGE.

$$SN = a_1 * e_1 + a_2 * e_2 * m_2 + a_3 * e_3 * m_3$$

Aplicando las variables mencionadas a la ecuación se obtiene:

SN = 0.43 \* 2.36pulg + 0.14 \* 13.78pulg \* 1 + 0.12 \* 5.90pulg \* 1  
se obtiene que:

$$SN = 3.652$$

Ilustración 44: Ventana del Cálculo de los EJES EQUIVALENTES admisibles para Base Granular

En la ilustración 43 muestra el resultado de los ejes equivalentes (ESAL'S - W18) obtenidos para la falla del sistema multicapas donde se muestra que el paquete de firmes con la incorporación de la Base Granular reemplazando al Macadam Hidráulico atiende un tráfico solicitante de **W18 = 1.520.000 ESAL's**, que resulta lógico ya que es menor a la que atiende el paquete con la capa Base de Macadam Hidráulico, debido a que este último tiene mejores prestaciones.

## COSTO DE PRODUCCION Y DE CONSTRUCCION

En cuanto a la comparación de costos entre una Base de Macadam Hidráulico y una Base Granular (90-10) se plantea una comparación en dos etapas que son la de producción y construcción como se observa a continuación.

### Análisis del costo unitario de producción:

#### Base Granular:

Ilustración 45: Costos unitario de producción de una Base Granular (90-10)

Formulario de Análisis de Precios Unitarios								
<b>FECHA:</b>		Mezcla de Piedra - Base granular (90-10)				<b>UNIDAD:</b>		<b>Tn</b>
		Obra: PROYECTO FINAL DE GRADO						
A) Equipo a Utilizar	Modelo Equipos	Horas de c/quipo	COSTO HORARIO		COSTO TOTAL HORARIO			
			GS.	US\$	GS.	US\$		
PLANTA SUELO 350/600 Tn/Hs Ciber	PS-02002	C 50 P (Cuadru	1.00	283,114	-	283,114	-	
PALA CARGADORA CATERPILLAR	PCTG-002 -	938 H	1.30	307,333	-	399,533	-	
	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	
A) Total						<b>682,647</b>	-	
B) Mano de Obra	Cantidad Personal	Horas de c/personal	COSTO HORARIO		COSTO TOTAL HORARIO			
			GS.	US\$	GS.	US\$		
Oficial	O	1.00	1.50	35,070	-	52,605	-	
Ayudante A	AA	2.00	1.50	28,056	-	84,168	-	
	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	
B) Total						<b>136,773</b>	-	
C) Producción de equipo p/h =		200.00	Costo Horario ( A + B )		<b>819,420</b>		-	
D) Costo Unitario de la Ejecución: (A + B)/C = D					Gs		<b>4,097</b>	-
E) Materiales	Unidad	Consumo	COSTO UNITARIO		COSTO TOTAL UNITARIO			
			GS.	US\$	GS.	US\$		
Piedra Triturada	Tn	0.90	50,000	-	45,000	-		
Arena Lavada dragada	Tn	0.10	15,625	-	1,563	-		
	0	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-	-		
Total E						<b>46,563</b>	-	
F) Transporte	DMT Km	Consumo	COSTO UNITARIO		COSTO TOTAL UNITARIO			
			GS.	US\$	GS.	US\$		
	-	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-	-		
Total F						-	-	
Costo Directo Total: D]+E]+F]						50,660	-	

## Macadam Hidráulico:

Ilustración 46: Costo unitario de producción de una base de Macadam Hidráulico.

Formulario de Análisis de Precios Unitarios							
<b>FECHA:</b>		Item: Piedra Partida - Macadam Hidraulico				UNIDAD:	Tn
		Obra: PROYECTO FINAL DE GRADO					
A) Equipo a Utilizar	Modelo Equipos	Horas de c/quipo	COSTO HORARIO		COSTO TOTAL HORARIO		
			GS.	US\$	GS.	US\$	
PALA CARGADORA CATERPILLAR		0.250	294,228	-	73,557	-	
	0	-	-	-	-	-	
	0	-	-	-	-	-	
	0	-	-	-	-	-	
	0	-	-	-	-	-	
	0	-	-	-	-	-	
	0	-	-	-	-	-	
	0	-	-	-	-	-	
A) Total					73,557	-	
B) Mano de Obra	Cantidad Personal	Horas de c/personal	COSTO HORARIO		COSTO TOTAL HORARIO		
			GS.	US\$	GS.	US\$	
Oficial O	1.00	1.00	35,070	-	35,070	-	
Ayudante A AA	2.00	1.00	28,056	-	56,112	-	
	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	
B) Total					91,182	-	
C) Producción de equipo p/h =		150.00	Costo Horario ( A + B )		164,739	-	
D) Costo Unitario de la Ejecución: (A + B)/C = D					Gs	1,098	
E) Materiales	Unidad	Consumo	COSTO UNITARIO		COSTO TOTAL UNITARIO		
			GS.	US\$	GS.	US\$	
Piedra Cero p/ Macadam	Tn	0.570	30,000	-	17,100	-	
Piedra Cerito p/ Macadam	Tn	0.430	30,000	-	12,900	-	
Piedra Triturada 6ta	Tn	0.087	50,000	-	4,350	-	
Piedra Triturada 5ta	Tn	0.018	50,000	-	900	-	
Arena	Tn	0.079	15,625	-	1,234	-	
	-	-	-	-	-	-	
Total E					36,484	-	
F) Transporte	DMT Km	Consumo	COSTO UNITARIO		COSTO TOTAL UNITARIO		
			GS.	US\$	GS.	US\$	
						-	
						-	
						-	
Total F					-	-	
Costo Directo Total: D)+E)+F]					37,582	-	

En las ilustraciones 44 y 45 se pueden apreciar los costos de producción de ambos tipos de base, observándose claramente que una base granular (90-10) tiene un costo más elevado con respecto a una base de macadam hidráulico, en una diferencia de 16.235 Gs por cada metro cubico producido.

En cuando a la construcción se tiene:

## Análisis del costo unitario de producción:

### Base Granular:

Ilustración 47: Costo unitario de la construcción de una Base Granular (90-10)

Formulario de Análisis de Precios Unitarios

Item :					Base granular (90-10)		UNIDAD: m <sup>3</sup>	
A - EQUIPOS A UTILIZAR	Modelos de Equipos	Horas de Equipos	Costo Horario		COSTO TOTAL HORARIO			
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera		
ACABADORA DE SUELO VOGELE	2100-e	2100-E	1.00	1,012,354	-	1,012,354	-	
MOTONIVELADORA CATERPILLAR	MNTO-003	140 K	0.28	378,810	-	106,067	-	
VIBRO COMPACTADOR PATA DE CABRA / LISO CA VCCTF-004		CS563E	0.91	177,667	-	161,677	-	
VIBRO COMPACTADOR NEUMATICO CHLJGTH	CNCTF-003	LTP1016H	0.91	163,385	-	148,680	-	
CAMION REGADOR DE AGUA GMC	CPCTF-002	C7500	0.16	116,323	-	18,612	-	
MOTOBOMBA <sup>4</sup> AGRALE	MBCTF-006	M790	0.16	58,965	-	9,434	-	
			-	-	-	-	-	
			-	-	-	-	-	
A) Total Gs + US\$ / h						1,486,824	-	
B - MANO DE OBRA COMPLEMENTARIA	Cantidad de Personal	Horas de Personal	Costo Horario		COSTO TOTAL HORARIO			
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera		
Capataz	C	1.00	1.00	68,267	-	68,267.00	-	
Oficial	AA	1.00	1.00	35,070	-	35,070.00	-	
Ayudante A	AA	2.00	1.00	28,056	-	56,112.00	-	
			-	-	-	-	-	
			-	-	-	-	-	
B) Total Gs + US\$ / h						159,449	-	
C - PRODUCCION DEL EQUIPO P/H =			65.00	Costo Horario ( A + B )		1,616,273	-	
D - COSTO UNITARIO DE LA EJECUCION: (A + B) / (C) = D					Gs + US\$ / m <sup>3</sup>		24,866	-
E - MATERIALES	Unidad	Consumo	Costo Unitario		COSTO TOTAL UNITARIO			
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera		
Mezcla de Piedra - Base granular (90-10)	Tn	2.70	50,660	-	136,782	-		
			-	-	-	-		
			-	-	-	-		
			-	-	-	-		
			-	-	-	-		
Total E)			Gs. + US\$ / m <sup>3</sup>		136,782	-		
F - TRANSPORTE	DMT (Km)	Consumo	Costo Unitario		COSTO TOTAL UNITARIO			
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera		
			-	-	-	-		
			-	-	-	-		
			-	-	-	-		
			-	-	-	-		
Total F)			Gs. + US\$ / m <sup>3</sup>		-	-		
Costo Directo: D + E + F			Gs. + Moneda Extranjera		161,648	-		

## Macadam Hidráulico:

Ilustración 48: Costo unitario de la construcción de una base de Macadam Hidráulico

Formulario de Análisis de Precios Unitarios

Item: Macadam Hidraulico				UNIDAD: m3		
A - EQUIPOS A UTILIZAR	Modelos de Equipos	Horas de Equipos	Costo Horario		COSTO TOTAL HORARIO	
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera
TOPADORA JD 650		0.008	280,186	-	2,241	-
VIBRO COMPACTADOR PATA DE CABRA / LISO CATERPILLAR		0.013	192,959	-	2,508	-
VIBRO COMPACTADOR NEUMATICO CHLIGH		0.013	177,667	-	2,310	-
MOTONIVELADORA CATERPILLAR		0.002	378,810	-	758	-
CAMION REGADOR DE AGUA GMC		0.006	116,323	-	698	-
MOTOBOMBA 4' AGRALE		0.003	58,965	-	177	-
A) Total Gs + US\$ / h					8,692	-
B - MANO DE OBRA COMPLEMENTARIA	Cantidad de Personal	Horas de Personal	Costo Horario		COSTO TOTAL HORARIO	
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera
Cuapataz C	1.00	0.014	68,267	-	955.74	-
Oficial OO	1.000	0.014	35,070	-	490.98	-
Ayudante A AA	2.000	0.014	28,056	-	785.57	-
B) Total Gs + US\$ / h					2,232	-
C - PRODUCCION DEL EQUIPO P/H =		1.00	Costo Horario ( A + B )		10,924	-
D - COSTO UNITARIO DE LA EJECUCION: (A + B) / (C) = D			Gs + US\$ / m3		10,924	-
E - MATERIALES	Unidad	Consumo	Costo Unitario		COSTO TOTAL UNITARIO	
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera
Piedra Partida - Macadam Hidraulico	to	2.55	37,582	-	95,834	-
Total E) Gs + US\$ / m3					95,834	-
F - TRANSPORTE	DMT (Km)	Consumo	Costo Unitario		COSTO TOTAL UNITARIO	
			Gs.	Moneda Extranjera	Gs.	Moneda Extranjera
Total F) Gs + US\$ / m3						
Costo Directo: D + E + F			Gs. + Moneda Extranjera		115,451	-

En las ilustraciones 46 y 47 se pueden apreciar los costos de construcción de ambos tipos de base, observándose claramente que una base granular (90-10) tiene un costo más elevado con respecto a una base de macadam hidráulico, en una diferencia de 57.673 Gs por cada metro cubico construido.

## CAPITULO 8

### ESPECIFICACIONES TECNICAS

#### **BASE DE MACADAM HIDRAULICO**

##### **Descripción**

La base de macadam hidráulico consistirá en dos capas de piedra triturada y material de relleno, construidas sobre la capa inmediatamente inferior previamente preparada y en conformidad con los alineamientos, perfil, dimensiones y secciones transversales establecidos en los planos.

##### **Preservación del medio ambiente**

A los efectos de disminuir el impacto ambiental producido como consecuencia de la ejecución de este ítem, el Contratista deberá seguir las indicaciones señaladas en las ETAGs y las dispuestas por la Fiscalización antes de iniciar las tareas, también deberá tomar las precauciones para evitar contaminación de cualquier tipo.

##### **Materiales:**

##### **Agregado grueso**

La piedra para este trabajo consistirá en partículas limpias, tenaces y durables, preferencialmente del tipo basálticas y estará exenta de fragmentos laminares, alargados o conchoidales, material blando o alterado y sustancias nocivas o impurezas y deberá satisfacer los siguientes requisitos:

- Distribución granulométrica: La primera capa de piedra deberá satisfacer la graduación A de la tabla y para la segunda capa deberá satisfacer la graduación del tipo B, ambas capas estabilizadas previamente mediante la utilización de topadoras. A menos de que la fiscalización apruebe otra cosa. En la primera capa las partículas deberán tener un diámetro aproximado de 4" y para la segunda capa un diámetro aproximado de 2 1/2", según lo expresado en el capítulo 1, proceso constructivo aplicado.

Tabla 30: Fajas granulométricas de las diferentes capas de macadam

Tamices pulg	Tamices mm	Porcentaje que pasa			
		Agregado grueso		Agregado fino (relleno)	
		Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D
4"	101.6	100			
3 1/2"	88.9	98.2 - 100			
3"	76.2	97.1 – 98.3			
2 1/2"	63.5	86.3 – 91.3	100		
2"	50.8	-	90 – 100		
1 1/2"	38.1	64.9 – 66.1	35 – 70		
1"	25.4	-	0 - 15		
3/4"	19.1	42 – 46.3	-	100	100
1/2"	12.7	30.6 – 35.1	0 – 5	88.9	100
Nº100	0.15	-	-	18.5	23.5

- **Porcentaje de abrasión de los Ángeles:** (Norma utilizada: UNE 83-116-90; IRAM 1532/71), inferior a 15.1%.
- **Factor de Cubicidad:** Norma utilizada es la IRAM 1681,  $f = 0.5$
- **Determinación de ataques por Sulfato en Agregados:** (Norma IRAM 1531 5.1.4.1) inferior a 12%

**Agregado fino o material de relleno:** El material de relleno consistirá en recebo de piedra. Las partículas deberán ser no plásticas, limpias, tenaces y durables, exentas de tierra u otros materiales nocivos. Cuando sean sometidos a la prueba de durabilidad con soluciones de sulfatos de sodio en cinco ciclos, no deben presentar pérdidas iguales a superiores al 18%. El material pasado por la malla Nº (10) no debe exhibir desgaste en la prueba de abrasión Los Ángeles superior a 40%. El equivalente de arena debe ser igual o superior a 40%.

**Primera capa:**

El material de relleno para esta capa estará compuesto de una mezcla de material de trituración 5ta y 6ta, en la siguiente proporción, 75% 6ta y 25% 5ta y deberán satisfacer los requisitos de grad. C de la tabla arriba expuesta.

**Segunda capa:**

El material de relleno para la capa superior de piedra (cerito) es una mezcla de arena de yacimiento con triturada 6ta con una proporción de, 30% triturada 6ta y 70% arena, y deberán satisfacer los requisitos de grad. D de la tabla arriba expuesta.

**Equipo:**

Todo el equipo y herramienta deberán ser mantenidos en condiciones de funcionamiento satisfactorio y ser aprobados por la Fiscalización.

El equipo para la ejecución de los trabajos deberá ser provisto, entre otras, de unidades como las siguientes:

Maquina esparcidora: Auto propulsada, sobre oruga, u otros dispositivos capaces de esparcir el agregado uniformemente con un mínimo de segregación, sin causar daño o desplazamiento a la capa subrasante o capa subyacente, como topadoras livianas o motoniveladoras.

Aplanadora: Vibrocompactador liso, mínimo de la característica del tipo CA – 25 y compactador neumático, mínimo del tipo CP – 27.

Regador: La capacidad mínima de 5000 litros, provisto de bomba para cargar y barra de distribución a presión.

No será permitido el empleo de cualquier equipo que pueda provocar daños en las capas inferiores. Deberá ser previsto un conjunto balanceado, racional y suficiente para la perfecta ejecución de los servicios.

Todos los equipos a emplear deberán ser previamente aprobados por la Fiscalización en base a pruebas ejecutadas antes del inicio de los trabajos, debiendo el equipo ser mantenido en condiciones satisfactorias hasta el final de la obra.

**Proceso Constructivo:**

**Capa subyacente:**

La subrasante o capa subyacente deberá estar terminada, de acuerdo con lo dispuesto en las especificaciones respectivas, y no deberá estar húmeda al iniciarse la construcción de la base. Cualquier huella creada por el tráfico o cualquier parte blanda motivada por el mal drenaje o por cualquier otra causa, deberá corregirse, compactarse y debe ser aprobado por la Fiscalización antes

de ser colocada la base de Macadam Hidráulico. El control de la pendiente entre los bordes de la base deberá hacerse por medio de pasadores (aguja, fichas) colocados paralelos a la línea del centro del camino en puntos fuera del lecho del mismo de forma que se pueda tender un cordel entre ellos. Cuando el pavimento tiene una sola pendiente y el esparcido se hace en media sección, deberá comenzar en su parte más alta para proteger la capa subyacente y favorecer el buen drenaje.

#### **Capa aisladora:**

Donde sea requerido según criterio de la Fiscalización, se esparcirá sobre la subrasante o capa subyacente preparada, agregado fino para construir una capa aisladora. El espesor de suelo deberá ser el indicado por la Fiscalización. La cantidad del agregado no será, en ningún caso, menor que 40 kg/m<sup>2</sup>. Deberá ser esparcido por métodos similares a los empleados para esparcir el agregado grueso. El agregado de esta capa será regado antes y durante la compactación, en cantidades apenas suficientes como para permitir la acción aglutinante y darle firmeza durante la compactación. La capa aisladora será mantenida en las condiciones de espesor y compactación acabados, hasta que el agregado grueso sea colocado sobre ella.

A menos que la Fiscalización autorice otra forma, la capa aisladora o relleno invertido mencionado, no deberá ser colocada más allá de 300m. delante de donde se esté ejecutando y concluyendo la capa de macadam.

#### **Esparcido del agregado grueso:**

La capa subyacente deberá ser examinada y aceptada por la Fiscalización antes de comenzar el esparcimiento del agregado grueso. El agregado grueso será esparcido uniformemente en dos capas con una altura tal que después de compactado se obtenga el espesor requerido, como se menciona más abajo. No se permitirá, en ningún caso, echar el material desde el vehículo, tampoco acarrearlo por encima de la capa de base que este parcialmente construida. Durante el esparcido y antes del apisonado del agregado grueso, el contratista hará verificaciones de la corrección de superficie y perfil transversal de la capa esparcida por medio de regla colocada en su sección transversal a intervalos

no mayores que 3 metros. Cualquier rectificación necesaria será hecha quitándole material a las partes que hayan quedado más elevadas y agregándole a las partes que hayan quedado más bajos. Materiales blandos o laminares o piedras de tamaño excesivos serán retirados, el agregado grueso deberá presentar una distribución uniforme en tamaños y cualquier área de segregación deberá ser removida y sustituida por material uniformemente adecuado.

### **Compactación y relleno:**

En la construcción de la capa de macadam, todo el cuidado debe ser ejercido para garantizar que los vacíos en el agregado grueso queden completamente llenados por el agregado fino y la operación de relleno debe conducirse de modo a evitar la flotación del agregado grueso.

Se usará compactadores rodillos lisos vibratorios o de llantas neumáticas.

Deberá proveerse un número suficiente de equipos para completar la compactación y el relleno de la cantidad de capas esparcidas cada día y esta no deberá exceder la capacidad de compactación de los equipos proveídos.

Inmediatamente después del regulado de la superficie, se iniciará la compactación de la primera capa con rodillos lisos vibratorios a partir de los bordes y con un sobre ancho de 30 cm cada lado de la plataforma.

Después de que los bordes estuvieran compactados, el apisonado progresará gradualmente hacia el eje de la calzada. Cuando la sección transversal tiene una sola pendiente, la compactación avanzará del borde más bajo hacia el más alto. Esa operación continuará hasta cesar el rebajamiento y no ser visible ningún desplazamiento de la piedra delante de la rueda del compactador.

No se ejecutarán maniobras del compactador sobre la capa que está siendo comprimida y se mantendrá moderada su velocidad, principalmente en las rampas, a fin de no dislocar el material esparcido.

Inmediatamente antes de la conclusión del apisonado y antes de la distribución del material de relleno para la capa denominada cero, se verificará la existencia de protuberancias y depresiones u otras irregularidades. Las áreas con irregularidades que según la Fiscalización sean inadecuadas, serán aflojadas y

el material en exceso removido o nuevo material añadido según sea el caso, recompactadas y tratadas como sea requerido para eliminar los defectos y proveer una capa de resistencia uniforme en general y con una superficie conforme a la sección transversal y la rasante.

Después de que la piedra gruesa de la primera capa estuviere completamente apisonada y encajada, se procede al relleno de sus vacíos, de acuerdo con lo expresado más arriba en el apartado de **Agregado fino o material de relleno, Primera capa**, deben ser colocados en pista con camiones volquetes para su posterior extendido manual, lo más seco posible, por medio de herramientas manuales. Este será distribuido sobre la superficie en una cantidad aproximada de 25 kg/m<sup>2</sup>.

Cuando ya no es posible la penetración de los materiales de relleno en seco, es necesario humedecer la capa, nivelar y compactar el material de relleno.

La operación de humedecimiento y la aplicación de material, deben realizarse según lo expuesto en el capítulo 1 y en el acápite **Agregado grueso**.

Finalmente, la superficie humedecida quedará limpia y compactada con el rodillo liso vibratorio.

Luego de realizado el relleno de la primera capa se procede a realizar el esparcido de la segunda capa (cerito) como se indica en el acápite de Esparcido del agregado grueso, la compactación de esta capa responde a los mismos requerimientos y procedimientos de la primera capa, y según lo expresado en el capítulo 1 "Proceso constructivo aplicado".

Para cubrir los vacíos en la segunda capa denominada cerito se deben seguir lo descrito en el párrafo de **Agregado fino o material de relleno, Segunda capa**, en una proporción de 40kg/m<sup>2</sup> aproximadamente, la compactación para esta última relleno será con compactadores tipo liso seguidos de compactadores neumáticos.

### **Acabado**

Inmediatamente después de que los intersticios de una sección de la capa hayan sido llenados satisfactoriamente con recebo, y no haya recebo sobrante sobre la superficie, la misma deberá ser aglutinada con agua en el mismo día o

tan pronto como sea posible. El riego deberá ser hecho con camiones regadores de capacidad suficiente como para permitir la conclusión del trabajo de aglutinación en el mismo día de su inicio. La cantidad de agua deberá ser apenas suficiente para arrastrar el relleno hacia abajo y llenar los vacíos. Luego del primer riego, la capa deberá ser compactada y barrida, distribuyéndose al mismo tiempo por métodos manuales agregado fino adicional en las áreas donde sea necesario.

Sobre una capa aglutinada como fue arriba descrita no se deberá aplicar ninguna capa adicional o imprimación antes que hayan transcurrido 24 horas. Para retener, en tiempo seco, la humedad remanente en la capa después de 24 hs. de reposo, el contratista deberá efectuar riegos adicionales hasta la aplicación de una capa subsiguiente o de la imprimación.

**Protección y Conservación:**

La superficie de la capa debe mantenerse en condiciones acabadas hasta la construcción de la siguiente capa, la cual deberá ser ejecutada tan pronto como sea practicable. Durante este periodo no se permitirá el tránsito sobre la base construida, a fin de no desagregar el material de su superficie. Cualquier daño que experimente la capa de base por tránsito de equipo de construcción o por cualquier otra causa, deberá ser reparado por el contratista a sus expensas.

**Reconstrucción de Macadam:**

Si la capa subyacente se ablanda o se mezcla con material de la capa base o si con este se mezcla el material no apto, el contratista deberá remover la parte afectada, volver a empezar, compactar la capa subyacente y reemplazar la sección quitada de acuerdo con los requisitos anteriores sin compensación adicional.

**Método de medición:**

Las cantidades de base de macadam hidráulico a pagarse serán los metros cúbicos (m<sup>3</sup>) compactados y terminados. Las mediciones se harán mediante cálculos basados en las dimensiones contenidas en el proyecto. Si, a través del control efectuado por los elementos de la fiscalización, durante el transcurso de

los trabajos se verifique que los volúmenes superan aquellos indicados en el proyecto, no se medirá para pago ningún exceso.

En el caso de que durante el control arriba mencionado hayan sido comprobados deficiencias en lo volúmenes en relación a los indicados en el proyecto, pero de magnitud insuficiente para obligar a rehacer el trabajo, a exclusivo criterio de la fiscalización, se deducirán tales deficiencias de los volúmenes calculados de acuerdo a las dimensiones indicadas en el proyecto.

**Forma de pago:**

Los números de metros cúbicos medidos conforme se ha indicado en el ítem anterior serán pagados a los precios unitarios contractuales de los ítems de trabajo de la lista de precios bajo el siguiente nombre "MACADAM HIDRAULICO "

Este precio será compensación total por la ejecución de los trabajos aquí descritos, suministro de todo el equipo necesario, mano de obra, carga, transporte de material, manejo del tránsito pasante, señalización provisoria, obra de desagüe y drenaje durante la construcción, supervisión, servicios y los imprevistos para la ejecución y terminación total de este ítem.

## CAPITULO 9

### CONCLUSIONES

- Se concluye que la utilización del Macadam Hidráulico como material para las ultimas capas, sea subbase o base de acuerdo a lo especificado, presenta un muy buen comportamiento estructural, reflejado en el coeficiente estructural  $a_2=0.22$  y módulo de resiliente 485 MPa obtenidos por el método de diseño de pavimentos AASHTO 93, en el capítulo de verificación del paquete estructural y por el retroanálisis realizado.
- La importancia de un material llamado macadam en la cual se utiliza los materiales que abunda en el país que es la piedra basáltica y por un proceso mecanizado se logra un buen comportamiento estructural para paquetes de firmes.
- La importancia de la utilización del deflectómetro de impacto (DWF) como una manera a evaluar de forma no destructiva las propiedades de las capas estructurales.

### RECOMENDACIONES

- En Paraguay sería recomendable que deban realizarse mediciones luego de que la obra esté terminada, dejando un periodo de 6 meses para que madure el pavimento. De esa forma se empieza a disponer de una medición base sobre la cual se puede analizar deterioros, etc.
- Se sugiere además la creación de una base de datos para poder hacer seguimiento del avance del deterioro a lo largo del tiempo y emitir recomendaciones técnicas para realizar el control de calidad y tomar las medidas pertinentes.

- Dar continuidad a la línea de investigación a fin de realizar un trabajo similar con el macadam hidráulico en base al método constructivo y especificaciones estándar utilizadas dentro del territorio Nacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1 1. AASTHO, Guide for of Pavement Structures, EEUU, 1993.  
]
- [2 I. d. P. R. -. IPR, «Pavimentos flexiveis - Macadame hidraulico - Espicifacção de  
] serviço,» de *DNIT*, 2009.
- [3 U. UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA"JOSE SIMEON CAÑAS",  
] ANALISIS DE TAMAÑO DE PARTICULAS POR TAMIZADO EN  
AGREGADO FINO Y GRUESO Y DETERMINACION DE MATERIAL MAS  
FINO QUE EL TAMIZ No 200 (0.075mm) EN AGREGADO MINERAL POR  
LAVADO.
- [4 A. S. G. A. Valdivia, CARACTERIZACION DE ROCAS Y ANALISIS DE SU  
] RESISTENCIA A FATIGA POR HENDIMIENTO, Chile, 2014.
- [5 «EcuRed,» [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Roca\\_de\\_Basalto](https://www.ecured.cu/Roca_de_Basalto).  
]
- [6 «Geología, rama y aplicaciones,» 2 Marzo 2018. [En línea]. Available:  
] [https://geologiaweb.com/rocas-igneas/basalto/#Minerales\\_principales\\_y\\_accesorios](https://geologiaweb.com/rocas-igneas/basalto/#Minerales_principales_y_accesorios).
- [7 L. P. M., «MOP - Direccion de Vialidad - Laboratorio Nacional,» [En línea].  
] Available:  
<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Clase%20de%20Vialidad%20C%202015.pdf>.
- [8 «EcuRed,» [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Pavimento\\_flexible](https://www.ecured.cu/Pavimento_flexible).  
]
- [9 I. F. S. Sabogal, *CURSO BASICO DE DISEÑO DE PAVIMENTO*, 2014.  
]
- [1 I. A. D. R. D. MATERIALES, Metodo de determinacion del factor de cubicidad -  
0] IRAM 1681, Diciembre 1981.
- [1 I. A. D. R. D. MATERIALES, Metodo de ensayo de durabilidad por ataque con  
1] sulfato de sodio - IRAM 1525, Octubre 1985.
- [1 «Ingenia Viarum,» [En línea]. Available:  
2] <https://ingeniaviarum.wordpress.com/2016/02/02/john-loudon-mcadam-1756-1836/>.
- [1 M. H. L. NORIEGA, RELACION ENTRE EL MODULO RESILIENTE  
3] HALLADO POR RETROCALCULO Y EL ENCONTRADO EN ENSAYO DE  
LABORATORIO, BOGOTA - COLOMBIA, 2010.
- [1 I. G. M. M. Duarte, Evaluacion Estructural de la Ruta N10 mediante el Analisis de  
4] Deflectometria FWD, Asuncion, 2014.
- [1 R. A. CONTRERAS, DEFLECTOMETRIA - Subdepartamento de Auscultaciones  
5] y Prospecciones, 2015.
- [1 «INFORME DE EVALUACION DE PAVIMENTOS - RUTA NACIONAL N.6,  
6] DR JUAN LEON MALLORQUIN,» 2013.

- [1 F. O. Tarazona, CBR VS DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD) PARA  
7] DETERMINAR EL MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE EN  
EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, Bucaramanga, 2011.
- [1 J. F. H. A. LAURA MARCELA ARISTIZABAL MORALES, DISEÑO DE UN  
8] PAVIMENTO FLEXIBLE POR LOS METODOS AASTHO Y RACIONAL,  
2014.
- [1 I. J. M. Gomez, «Evaluacion de pavimento para la Ruta N9,» Asuncion , 2019.  
9]
- [2 S. Strategic Highway Research Program, SHRP layer Moduli Backcalculation  
0] Procedure, Washington DC, 1993.
- [2 R. G. PEREZ, METODOLOGIA Y APLICACION DEL RETROCALCULO DEL  
1] DEFLECTOMETRO DE IMPACTO (FWD) EN PAVIMENTOS FLEXIBLES,  
CASO PRACTICO: CARRETERA ABANCAY - CHALHUANCA., Lima, Peru,  
2009.
- [2 R. MEHTA Y. y ROQUE, Evaluacion of FWD data for determination of layer  
2] moduli of pavements., 2003.
- [2 DYNATEST, Manual del Deflectometro de Impacto keros LWD.  
3]