



UNIVERSIDAD DEL CAUCA
JUDITH MARYORI CASTRO GONZÁLEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

INFORME FINAL DE PASANTÍA
PROYECTO PRÁCTICA PROFESIONAL
PASANTE AUXILIAR DE INGENIERÍA EN LA ELABORACIÓN DE LOS
MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE ALTOS, MEDIOS Y
BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO DE COLOMBIA



Pasante:
JUDITH MARYORI CASTRO GONZÁLEZ

Director de Pasantía:
Ing. JULIA EUGENIA RUIZ ESTRADA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
POPAYÁN
2015



NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y jurado de la Práctica Profesional “PASANTE AUXILIAR DE INGENIERÍA EN LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE ALTOS, MEDIOS Y BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO DE COLOMBIA” realizada por JUDITH MARYORI CASTRO GONZÁLEZ, una vez evaluado el informe final y la sustentación del mismo, autorizan a la egresada para que desarrolle las gestiones administrativas para optar por el título de Ingeniera Civil.

Director de Pasantía

Jurado 1

Jurado 2

Popayán, ____ de septiembre de 2015



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 TÍTULO DE LA PASANTÍA	5
2 INTRODUCCIÓN	6
3 OBJETIVOS	7
3.1 Objetivo general	7
3.2 Objetivos específicos.....	7
4 INFORMACIÓN GENERAL.....	8
4.1 Nombre del Pasante	8
4.2 Entidad receptora	8
4.3 Tutor por parte de la Universidad del Cauca	8
4.4 Tutor por parte de la empresa receptora	8
4.5 Duración Pasantía	8
4.6 Descripción del proyecto en el que se desarrolla la Pasantía	9
5 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES VIALES	10
5.1 Generalidades	10
5.2 Módulo Resiliente de suelos.....	11
5.2.1 Definición	11
5.2.2 Métodos de determinación.....	14
5.2.3 Metodología de ensayo de laboratorio	15
5.2.4 Procesamiento del ensayo y resultados obtenidos	17
5.2.5 Aplicación del resultado en el diseño de pavimentos.....	19
5.3 Módulos Dinámicos de mezclas asfálticas	21
5.3.1 Definición	21
5.3.2 Métodos de determinación.....	21
5.3.3 Metodología de ensayo de laboratorio	22
5.3.4 Procesamiento del ensayo y resultados obtenidos	24



5.3.5	Aplicación del resultado en el diseño de pavimentos.....	26
6	DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES EJECUTADAS DURANTE PASANTÍA.....	27
6.1	Introducción.....	27
6.2	Descripción de actividades.....	27
6.2.1	Participar en el grupo de materiales y subrasante establecido para el desarrollo del contrato	27
6.2.2	Participar en la recolección y procesamiento de información de las variables materiales y subrasante que participan en el diseño de los pavimentos de altos, medios y bajos volúmenes de tránsito	30
6.2.3	Revisar información bibliográfica sobre la variable materiales y subrasante, caracterización dinámica de materiales y subrasante, módulo resiliente y módulo dinámico para el diseño de pavimentos	31
6.2.4	Procesar información sobre resultados de ensayos de laboratorio adquiridos en la bibliografía y requeridos para la caracterización dinámica de materiales viales	33
6.2.5	Manejar programas de computador requeridos para el análisis estructural de pavimentos.....	62
7	CONCLUSIONES	64
8	BIBLIOGRAFÍA	66



1 TÍTULO DE LA PASANTÍA

**AUXILIAR DE INGENIERÍA EN LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE
DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE ALTOS, MEDIOS Y BAJOS
VOLÚMENES DE TRÁNSITO DE COLOMBIA**



2 INTRODUCCIÓN

Teniendo como base lo establecido por la Universidad del Cauca en el acuerdo N° 027 de 2012 emanado por el Consejo Superior, el cual establece el trabajo de grado como requisito para adquirir el título de Ingeniero Civil, la Universidad Del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, reglamenta tres modalidades para la presentación de trabajo de grado siendo estas:

- ❖ Trabajo de Investigación
- ❖ **Pasantía o Práctica Profesional**
- ❖ Práctica Social

La modalidad escogida para el desarrollo del trabajo de grado es pasantía o práctica profesional, con el ánimo de poner en práctica el conocimiento adquirido en el proceso de formación, y con el fin de lograr un desarrollo íntegro en mi formación como Ingeniera Civil.

Por lo anterior y gracias al contrato que se estableció entre la Universidad del Cauca y el Instituto Nacional de Vías, es posible la participación en LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE COLOMBIA, participando en las actividades técnicas desarrolladas en el transcurso del proyecto.

El presente documento contempla información recopilada de la experiencia realizada y los conocimientos técnicos adquiridos durante el desarrollo de la pasantía, que estarán enfocados en la cuantificación de las variables y los procedimientos modernos del diseño de pavimentos flexibles con altos, medios y bajos volúmenes de tránsito de Colombia.



3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Participar como auxiliar de ingeniería en la elaboración de los manuales de altos, medios y bajos volúmenes de tránsito, dentro del contrato suscrito entre la Universidad del Cauca y el Instituto Nacional de Vías, para poder aplicar los conceptos básicos de pavimentos adquiridos durante la formación académica en la facultad de ingeniería y conocer los futuros desarrollos tecnológicos para el dimensionamiento moderno de los pavimentos.

3.2 Objetivos específicos

- ❖ Participar en el grupo de materiales y subrasante establecido para el desarrollo del contrato.
- ❖ Participar en la recolección y procesamiento de información sobre caracterización dinámica de materiales viales y suelos de subrasante que participan en el diseño de los pavimentos de altos, medios y bajos volúmenes de tránsito.
- ❖ Revisar información bibliográfica sobre la variable materiales y subrasante, caracterización dinámica de materiales y subrasante, módulo resiliente y módulo dinámico para el diseño de pavimentos.
- ❖ Procesar información sobre resultados de ensayos de laboratorio adquiridos en la bibliografía y requeridos para la caracterización dinámica de materiales viales.
- ❖ Manejar programas de computador requeridos para el análisis estructural de pavimentos.



- ❖ Presentar informes de avance según el cronograma de actividades previsto durante la pasantía para que sean evaluados por el Director.
- ❖ Presentar un informe final de acuerdo a lo estipulado por la Universidad del Cauca y adicionalmente realizar la sustentación, socializando en forma general el desarrollo de la pasantía.

4 INFORMACIÓN GENERAL

4.1 Nombre del Pasante

Judith Maryori Castro González

4.2 Entidad receptora

Universidad del Cauca

4.3 Tutor por parte de la Universidad del Cauca

Ing. Julia Eugenia Ruiz Estrada

4.4 Tutor por parte de la entidad receptora

- ❖ Ing. Carlos Alberto Benavides Bastidas
- ❖ Ing. Eugenio Chavarro Barreto

4.5 Duración Pasantía

La modalidad adoptada tiene una duración de 640 horas para cumplir con el requisito de trabajo de grado; Inicia en el mes de febrero de 2015, con asistencia continua y culmina en el mes de Agosto.



4.6 Descripción del proyecto en el que se desarrolla la Pasantía

❖ *Ejecución del Convenio N° 2141 de 2014*

El Instituto Nacional de Vías de Colombia conjuntamente con la Universidad del Cauca, han suscrito el **Convenio Interadministrativo No. 2141 del año 2014** para elaborar el nuevo MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS, MEDIOS Y ALTOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO y EL MANUAL DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO PARA CARRETERAS para la actualización de los manuales de capacidad y niveles de servicio en carreteras y de diseño de pavimentos asfálticos en carreteras con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

❖ *Posición Del Pasante*

El trabajo está dividido en dos grandes grupos, el primero relacionado con la actualización de los manuales de capacidad y niveles de servicio en carreteras y el segundo grupo en el cual se desarrolla esta pasantía como **auxiliar de ingeniería**, está relacionado con la **actualización del manual de diseño de pavimentos asfálticos en carreteras con altos, medios y bajos volúmenes de tránsito**.

5 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES VIALES

5.1 Generalidades

La caracterización dinámica de materiales viales se representa con la determinación de parámetros como el módulo resiliente de suelos y módulo dinámico de mezclas asfálticas, la relación de Poisson y la ley de fatiga o modelo de comportamiento del material (suelo, subrasante, carpeta).

Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico, en la Figura N°1 se presenta un esquema sobre dicha transferencia de las cargas. Con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales.

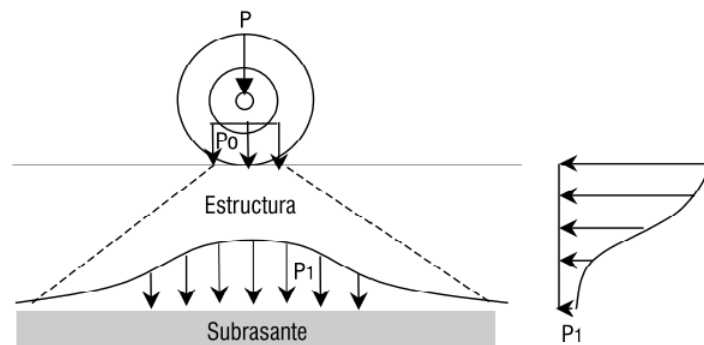


Figura N°1. Transferencia de cargas

Fuente: Revista Universidad EAFIT No. 125

El diseño y evaluación de pavimentos con propósitos de construcción y rehabilitación requiere de una cuidadosa determinación de factores tales como:



propiedades de los materiales, tipo de tránsito y volumen, condiciones ambientales, nivel de esfuerzos; número de aplicaciones de carga; tipo y contenido de asfalto; tipo y contenido de modificadores; características de las partículas; estado físico del suelo (peso volumétrico y contenido de agua); temperatura, etc.

La caracterización dinámica de materiales incluye, además, la determinación de la relación de Poisson, se denota mediante la letra griega μ , es un parámetro relacionado con las propiedades mecánicas de los diferentes materiales utilizados en Ingeniería. El módulo de Poisson se define como la razón de la deformación unitaria lateral a la deformación unitaria axial, algunos valores típicos para diferentes materiales son 0.5 para subrasante fina, 0.40 para base y 0.45 para subbase.

5.2 Módulo Resiliente de suelos

5.2.1 Definición

Se define el módulo resiliente como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como sigue:

$$Mr = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma d}{\epsilon_{axial}}$$

Donde,

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Deformación recuperable

Debido a la característica cíclica de las cargas impuestas por los vehículos, parte de la deformación se recupera cuando la carga es retirada. En la figura N° 2 se presenta un esquema de esfuerzos en la subrasante.

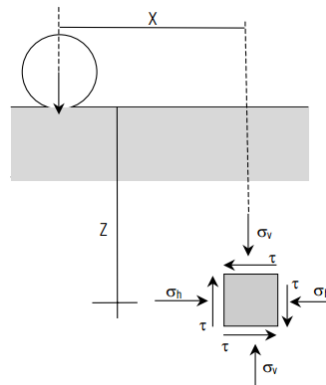


Figura N°2. Esquema de esfuerzos en la subrasante

Fuente: Revista Universidad EAFIT No. 125

En la figura N° 3 se aplica una carga creciente y se incrementa la deformación; cuando la carga se reduce la deformación también se reduce, pero no toda ella se recupera. Por lo tanto, la deformación total se compone de dos partes: una plástica o permanente y una elástica o resiliente. Únicamente, la resiliente o recuperada se utiliza para calcular el módulo resiliente.

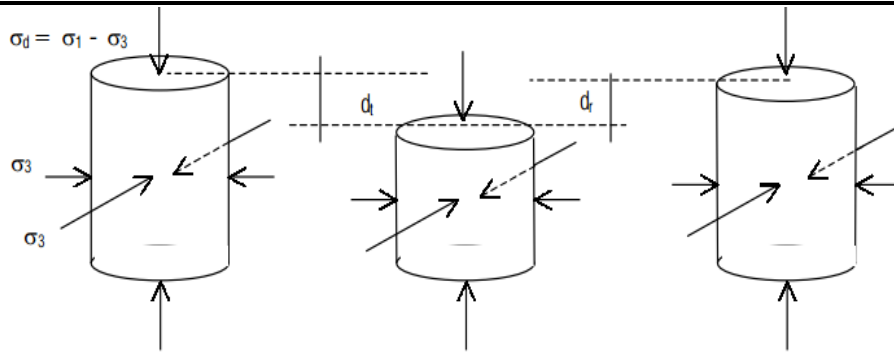


Figura N°3. Esquema de esfuerzos al que son sometidas las muestras de ensayo
 Fuente: Revista Universidad EAFIT No. 125

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama *módulo de resiliencia* (Figura N°4). Este concepto aplica tanto para suelos finos como para materiales granulares. Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

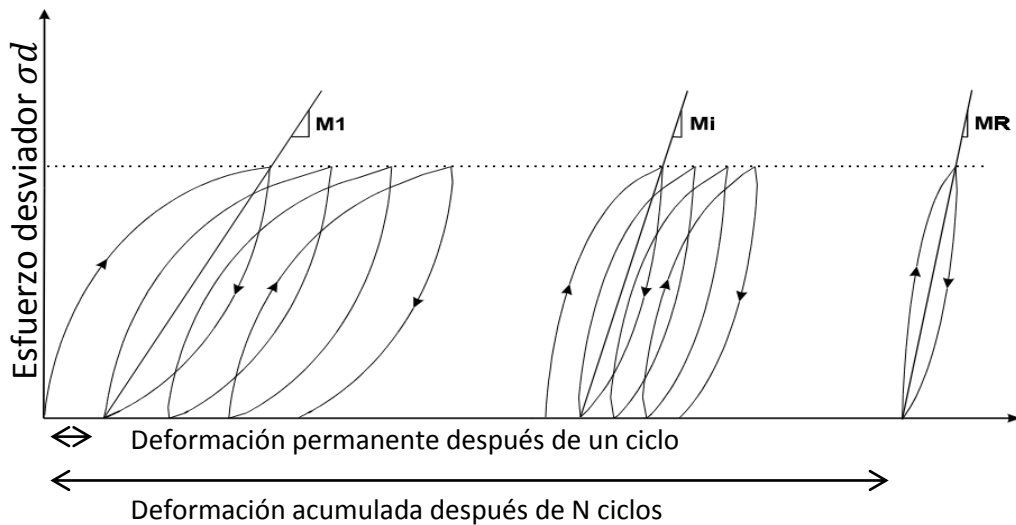


Figura N°4. Mecanismo de deformación permanente



5.2.2 Métodos de determinación

Uno de los métodos más conocidos para la determinación del módulo resiliente en suelos finos granulares, es presentado por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) en la norma T 294 y el protocolo de la norma de referencia AASHTO T 307 – 99 (2007), para Colombia la norma I.N.V. E – 156 – 2013 presentada por el Instituto Nacional de Vías. Este último método cubre los procedimientos normalizados para la determinación del módulo elástico-dinámico o de resiliencia de los suelos. Incluye la preparación y ensayo de suelos no tratados, bajo condiciones que representan una simulación razonable de las características físicas y de los estados de esfuerzos de los materiales de la subrasante, bajo pavimentos flexibles sometidos a las cargas debidas al tránsito.

Un esfuerzo axial desviador repetido, de magnitud, duración y frecuencia fijas se aplica a un espécimen cilíndrico de ensayo, debidamente preparado y acondicionado. Durante y entre las aplicaciones del esfuerzo dinámico desviador, el espécimen es sometido a un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. La respuesta a la deformación axial resiliente (recuperable) del espécimen, es medida y empleada para calcular los módulos resilientes dinámicos dependientes del esfuerzo.

Material Tipo 1 - Para el propósito de pruebas de módulo resiliente, material Tipo 1 incluye todos los granulares sin tratar de base y subbase y todos los de subrasante sin tratar que cumplan con los siguientes requisitos: menos de 70% pasa el tamiz de 2.00 mm (No. 10), menos del 20% pasa el tamiz de 75 μ m (No. 200) y el índice de plasticidad es menor o igual a 10%. Los suelos clasificados como Tipo 1 deberán ser moldeados en moldes de 150 mm de diámetro.

Material Tipo 2 - Para el propósito de pruebas de módulo resiliente, material Tipo 2 incluye todos los granulares sin tratar de base y subbase y todos los de



subrasante sin tratar que no cumplan los criterios para los suelos Tipo 1. Las muestras de suelo no tratado tomadas con tubo de pared delgada caen en la categoría Tipo 2.

5.2.3 Metodología de ensayo de laboratorio

5.2.3.1 Suelo de subrasante fina

- ❖ Consiste en someter a una probeta cilíndrica del material, confeccionada la probeta en condiciones representativas de aquellas que se esperan en el sitio, a una presión de confinamiento (σ_3) y a la acción de un tensor desviador axial pulsante de magnitud, duración y frecuencias fijadas (σ_d); y registrar la magnitud de la deformación axial resiliente recuperable de la probeta (ϵ_r).
- ❖ La combinación de esfuerzos son 15, la primera es de condicionamiento y el resto de evaluación, ver tabla N°1

Secuencia N°	σ_3 PSI	σ_d PSI
0	6	4
1	6	2
2	6	4
3	6	6
4	6	8
5	6	10
6	4	2
7	4	4
8	4	6
9	4	8
10	4	10
11	2	2
12	2	4
13	2	6
14	2	8
15	2	10

Tabla N° 1. Combinación de esfuerzos



5.2.3.2 Suelos granulares subbase y base

- ❖ En una máquina triaxial dinámica se somete a una probeta de suelo a una combinación de esfuerzos similares a las que tendría el material en realidad, la combinación de esfuerzos se encuentra en la tabla N°2.

Secuencia N°	σ_3 PSI	σ_d PSI	N° aplicaciones de carga
0	15	15	500
1	3	3	100
2	3	6	100
3	3	9	100
4	5	5	100
5	5	10	100
6	5	15	100
7	10	10	100
8	10	20	100
9	10	30	100
10	15	10	100
11	15	15	100
12	15	30	100
13	20	15	100
14	20	20	100
15	20	40	100

Tabla N° 2. Secuencia de aplicaciones de carga

5.2.3.3 La escogencia del método de compactación y el contenido de agua de moldeo de suelos cohesivos, dependen de las condiciones del terreno que van a ser simuladas por el espécimen de laboratorio:

- ❖ Especímenes que representen subrasantes cohesivas compactadas a humedades que correspondan a menos del 80% de saturación, que permanezcan en la condición como fueron construidas, podrán compactarse hasta la masa unitaria seca y húmeda del terreno, mediante procedimientos normales giratorios, de amasamiento o estáticos.



- ❖ Especímenes de ensayo que representen una subrasante que fue originalmente compactada a una humedad menor que la correspondiente al 80% de saturación, pero que ha experimentado posteriormente un aumento de humedad al someterse al servicio, se compactarán con la humedad esperada, empleando el método estático.

- ❖ El amasamiento se emplea para preparar especímenes que representan las condiciones en el terreno y de servicio del párrafo anterior, sólo si los especímenes se compactan al contenido inicial de agua (empleada en la construcción) y se someten luego a cambios después de la compactación.

- ❖ Los especímenes de ensayo que representen subrasantes cohesivas, compactadas en el terreno con contenidos de agua mayores que el 80% de saturación, se compactarán en el laboratorio empleando la compactación por amasamiento.

5.2.4 Procesamiento del ensayo y resultados obtenidos

5.2.4.1 Suelo de subrasante fina

Se obtiene un modelo de regresión que representa como varía el módulo resiliente en función del esfuerzo desviador, figura N°5:

$$M_r = k_3 \sigma_d^{-k_4}$$

Donde,

M_r = Módulo resiliente

k_3 y k_4 = Constantes de regresión

σ_d = Esfuerzo desviador

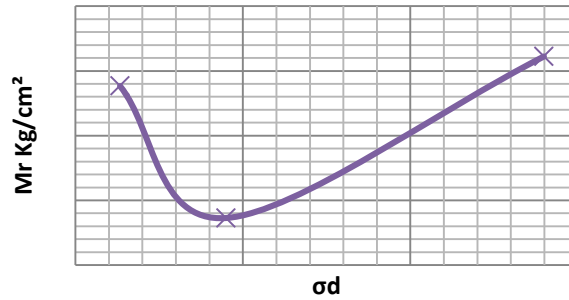


Figura N°5. Módulo resiliente en función del esfuerzo desviador

5.2.4.2 Suelos granulares subbase y base

Para cada combinación de esfuerzos se tiene un módulo y para cada combinación se calcula un invariante de tensión (θ). Con esta regresión se hace un análisis bilogarítmico donde se relaciona el Log Mr en función del Log θ , figura N°6.

$$Mr = k_1 \theta^{k_2}$$

Donde,

M_r = Módulo resiliente

K_1 y K_2 = Constantes de regresión

θ = invariante de tensión

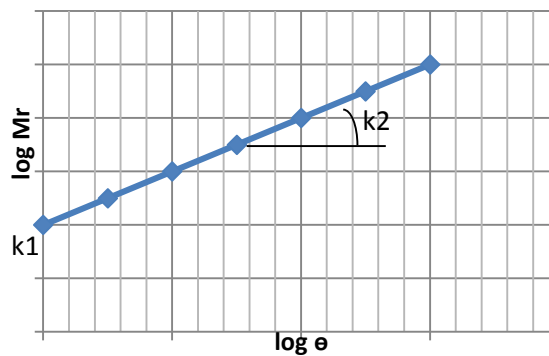


Figura N° 6. Relación Log Mr en función del primer invariante de tensiones



5.2.4.3 Modelo constitutivo universal

En general, el módulo resiliente de un suelo para diferentes estados de esfuerzos se estima usando el modelo constitutivo universal; se presenta a continuación:

$$M_r = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{K_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{K_3}$$

Donde,

M_r = Modulo resiliente

θ = Primer invariante de tensiones = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma d + 3\sigma_3$

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_2 = Esfuerzo principal intermedio = σ_3 para el ensayo de M_R en especimen cilindrico

σ_3 = Esfuerzo principal menor o presión de confinamiento o de camara

τ_{oct} = Esfuerzos octaédricos

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = \frac{\sqrt{2} * \sigma d}{3}$$

$$P_a = \text{Presión atmosférica} = 1,033 \frac{kg}{cm^2}$$

K_1, K_2 y K_3 = Constantes de regresión

5.2.5 Aplicación del resultado en el diseño de pavimentos

El ensayo de módulo resiliente proporciona la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación de los materiales de construcción de pavimentos flexibles para su empleo en el *análisis del sistema de capas en pavimentos*. También, proporciona un medio de *evaluación de los materiales* de construcción de pavimentos, incluyendo suelos de subrasante, bajo una variedad de condiciones



ambientales y de estado de esfuerzos, que simulen realísticamente las situaciones existentes en pavimentos sometidos a cargas móviles del tránsito.

Varias son las metodologías para diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles que consideran al parámetro módulo de resiliencia como la base para la *caracterización del comportamiento de suelos y materiales granulares*. Es por ello que la selección apropiada del módulo de resiliencia de un material se debe de realizar con sumo cuidado, teniendo en cuenta los factores que en él influyen.

Una de las metodologías actuales para diseño de pavimentos es la utilizada por el método AASHTO que considera que la propiedad fundamental para *caracterizar los materiales constitutivos* de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente, además para *caracterizar las propiedades dinámicas de los materiales* componentes de la estructura del pavimento, tanto para materiales finos granulares como grueso granulares.

Es por ello que el especialista encargado del diseño, construcción y conservación de tales estructuras, debe de tener el conocimiento básico de lo que el parámetro módulo resiliente representa, de la prueba de laboratorio a partir de la cual se obtiene y de los factores que hay que considerar para la selección del valor adecuado para su uso en una determinada metodología de diseño.

Se permite apreciar que el módulo resiliente de un suelo granular varía a lo largo del espesor de la capa porque a medida que se avanza en profundidad se disminuyen los esfuerzos. Lo anterior es una evidencia de la importancia de la evaluación de las propiedades dinámicas en el diseño de los pavimentos.



5.3 Módulos Dinámicos de mezclas asfálticas

5.3.1 Definición

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y el de la deformación unitaria máxima para determinadas condiciones de temperatura y frecuencia de aplicación de cargas, obtenido en un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava, así:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde,

$\sigma =$ Esfuerzo máximo

$\varepsilon =$ Deformación unitaria máxima

El comportamiento visco-elástico, dependiente de la temperatura y frecuencia de aplicación de carga, del material que compone la capa de rodadura (mezcla asfáltica y asfalto) es un elemento importante de considerar dentro del análisis de desempeño de las estructuras de pavimento flexible.

5.3.2 Métodos de determinación

Para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica existen diferentes métodos, entre las cuales están: ensayos de laboratorio y fórmulas o correlaciones. Dentro de los ensayos se encuentran el de *tracción indirecta*, el de *tracción por compresión directa* y el de *tracción de flexión de una viga cargada en el tercio central*. Cada uno de estos ensayos tiene sus características particulares,



y el usado comúnmente en Colombia, el de *tracción indirecta*, está regido por la norma INV – E 754: 2007 y la AASHTO presenta la norma T 342. En estas normas se especifican los detalles relacionados con la construcción del espécimen por ensayar y el procedimiento para determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

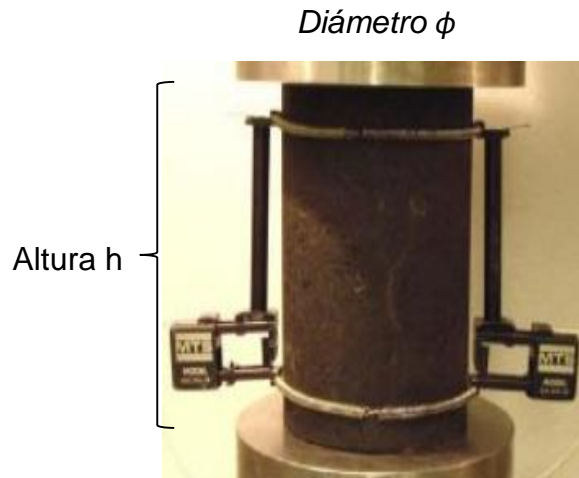
La segunda metodología, correspondiente a fórmulas o correlaciones, hace que determinar el módulo de las mezclas asfálticas sea un proceso más corto y preciso; dentro de esta metodología se encuentran cuatro métodos, que mediante la aplicación de ciertas expresiones matemáticas permiten conocer el valor del módulo dinámico utilizando diferentes variables, los métodos son: fórmulas de Bonnaure y otros, fórmulas del Instituto del Asfalto, fórmulas de Heukelomy Klomp y la fórmula de Witczak.

Existen diversas variables relacionadas con la determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica, cuyos valores hacen que la mezcla se comporte de forma satisfactoria o no, que se presenten o no daños tanto en la carpeta de concreto asfáltico como en la estructura de pavimento en conjunto, tales como fallas, fisuras, grietas, deformaciones y fatiga, entre otros. En las metodologías descritas anteriormente únicamente se tienen en cuenta las variables asociadas a las mezclas asfálticas.

5.3.3 Metodología de ensayo de laboratorio

- ❖ El ensayo de módulo dinámico se hace a la mezcla con la fórmula de trabajo, se realiza el diseño Marshall del cual se obtiene el % volumen de bitumen, % volumen de agregado y % volumen de vacíos, con estos resultados se elaboran probetas de prueba que pueden ser de tipo Marshall o para prueba de tracción indirecta. Los especímenes deberán tener una

relación entre la altura y el diámetro de 2 a 1, un diámetro mínimo de 101.6 mm (4") y un diámetro de cuatro o más veces el tamaño nominal máximo de las partículas del agregado. Para el ensayo se requerirán un mínimo de tres especímenes.



Las probetas de prueba para suelos con tamaño máximo de $\frac{3}{4}$, tienen como dimensiones: 30 cm de altura y 15 cm de diámetro.

- ❖ Cada briqueta se somete a cargas dinámicas en una combinación factorial de temperatura y frecuencia como se muestra en la tabla N°3.

Temperatura (°F)	0,1 Hz	1 Hz	10 Hz	25 Hz
10	x	x	x	x
40	x	x	x	x
70	x	x	x	x
100	x	x	x	x
130	x	x	x	x

Tabla N° 3. Serie de prueba

Para cada combinación se aplican 100 ciclos de carga y descarga, la mezcla es muy susceptible a la temperatura, si ésta aumenta el módulo dinámico disminuye, un incremento en la frecuencia indica un incremento en la velocidad del vehículo.

5.3.4 Procesamiento del ensayo y resultados obtenidos

- ❖ Con la información obtenida del ensayo de laboratorio se elabora una curva maestra la cual es una gráfica que permite representar la variación logarítmica del módulo dinámico en función de la temperatura en escala aritmética (ver figura N°8), para una frecuencia de referencia dada, donde normalmente esta frecuencia es de 10,6 Hz, esta representa una velocidad de vehículos del orden de 60 km/hr.

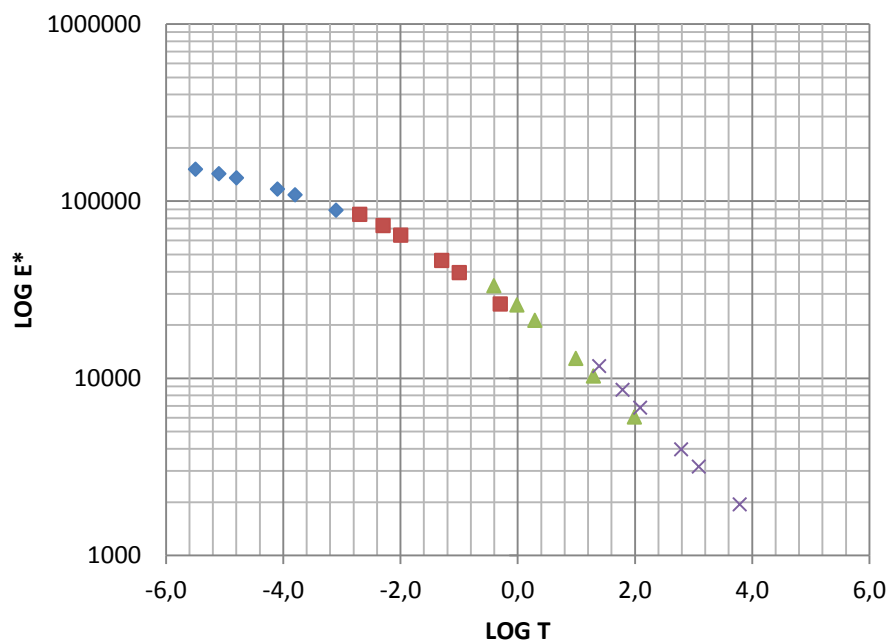


Figura N° 8. Curva maestra



❖ Se estima la frecuencia angular:

$$F = \frac{1}{T}$$

Donde,

$$T = 2 * \pi * t$$

$$\log t = 0.005h - 0.2 - 0.94\log(v)$$

Por lo tanto,

$$F = \frac{1}{2\pi t}$$

$h =$ espesor de la capa (cm)

$v =$ velocidad del vehículo ($\frac{Km}{hr}$)

$t =$ tiempo de aplicación de las cargas (segundos)

Conociendo las condiciones de temperatura de la mezcla en el sitio y la frecuencia se determina el módulo dinámico en la curva maestra. El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y frecuencia de aplicación de carga, incluso por las propiedades del asfalto y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas.



5.3.5 Aplicación del resultado en el diseño de pavimentos

La caracterización dinámica de los materiales utilizados en la construcción de carreteras es un reto indispensable para las regiones del país, pues de ello depende la certeza del dimensionamiento de la estructura de los pavimentos.

El módulo dinámico y la relación de Poisson de las mezclas asfálticas, se constituyen en un parámetro importante dentro del diseño por métodos empírico-mecanistas, pues hacen parte del algoritmo que ayuda a definir el espesor de cada capa de pavimento asfáltico, además puede emplearse para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento.

Es importante destacar que el módulo dinámico refleja de una forma más real el efecto de la aplicación de cargas, donde tanto el esqueleto mineral como el ligante son los encargados de la resistencia de estas cargas, mientras que un módulo resiliente por tensión considera prioritariamente los efectos sobre el ligante (cohesión) y las interacciones con el agregado (adherencia ligante – agregado).

El resultado del módulo dinámico se aplica en el análisis y evaluación de los pavimentos flexibles mediante la utilización de la teoría elástica, además de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto en el régimen elástico y viscoelástico.



6 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES EJECUTADAS DURANTE PASANTÍA

6.1 Introducción

Durante los seis meses de ejecución de la pasantía, como auxiliar de ingeniería en la elaboración de los manuales de diseño de pavimentos flexibles de altos, medios y bajos volúmenes de tránsito de Colombia, se cumplió satisfactoriamente con todos y cada uno de los objetivos específicos planteados, aplicando los conceptos básicos de pavimentos adquiridos durante la formación académica en la facultad de ingeniería y conociendo los más modernos desarrollos tecnológicos para el dimensionamiento de pavimentos, a continuación de describe en detalle las actividades realizadas acorde con cada objetivo, para que de esta manera quede constancia del cumplimiento de los mismos.

6.2 Descripción de actividades

6.2.1 Participar en el grupo de materiales y subrasante establecido para el desarrollo del contrato

DESCRIPCIÓN: Se participó en tres capacitaciones presenciales, una socialización del avance del manual y una inducción vía skype. Todas propuestas por el grupo técnico del manual, acorde con el tema específico de la pasantía materiales viales y suelo de subrasante.

Las capacitaciones se citan a continuación:



- ❖ La capacitación orientada por el ingeniero civil Msc. Manuel José Meza Soto, asesor experto nacional, los días 9 y 10 de abril de 2015 acerca del manejo del SOFTWARE MEPDG utilizado para el diseño de pavimentos, en esta ocasión se desarrollaron tres talleres sobre el diseño del pavimentos flexibles- nivel 1, nivel 2, y nivel 3, respectivamente.

- ❖ La capacitación orientada por el ingeniero Luis Guillermo Loría Salazar, PhD del LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES “LANAMME” de la Universidad de San José de Costa Rica, asesor experto internacional, el día 21 de abril de 2015, acerca del programa APAVI, respuestas de pavimentos rígidos y redes neurales artificiales basado en cálculos de ISLAB 2000, módulo de clima, tráfico, espectro de daño, distribución acumulada de daño por fatiga, materiales, entre otros, donde se adquiere un CD con material de apoyo.

- ❖ La capacitación orientada por el ingeniero civil Christopher Trejos Castillo proveniente de “LANAMME” de la Universidad de San José de Costa Rica, el día 28 de julio de 2015, acerca del software para el diseño mecanicista empírico de pavimentos de Colombia, se mostró paso a paso el manejo del software para hacer de una manera más factible el diseño de pavimentos, se hizo recomendaciones por parte de los ingenieros del grupo técnico del manual para ajustar el software a los requerimientos de Colombia.

- ❖ La socialización del avance del manual de pavimentos flexibles de altos, medios y bajos volúmenes de tránsito de Colombia entre el grupo técnico de trabajo y el ingeniero Alfonso Montejo Fonseca quien es la persona encargada de supervisar el progreso y desarrollo del manual.



- ❖ La inducción por medio de video-llamada realizada el día 3 de julio de 2015 por parte de la ingeniera civil e investigadora Paulina Leiva Padilla del LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES “LANAMMEUCR” de la Universidad de San José de Costa Rica, acerca del manejo de la herramienta IMoDin (Interfaz gráfica de cálculo del Módulo Dinámico).

Esta herramienta de cálculo permite la construcción de la curva maestra que caracteriza el comportamiento dinámico de la mezcla y el asfalto por medio de los modelos Christensen-Anderson (CA), Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM), Christensen-Anderson-Sharroock (CAS), y las ecuaciones de ajuste de Arrhenius, William Landel Ferry, y la ecuación de Susceptibilidad Viscosidad Temperatura (VTS), permitiendo a su vez la determinación del valor de módulo para el par frecuencia – temperatura específico de diseño.

Con esta herramienta es posible dar control al comportamiento de los resultados obtenidos en laboratorio, puesto que permite la construcción de una serie de gráficos de control de comportamiento de los datos obtenidos.

Gracias a esta inducción se realizó satisfactoriamente la elaboración de las curvas maestras de los resultados de ensayos obtenidos de la bibliografía.



6.2.2 Participar en la recolección y procesamiento de información sobre caracterización dinámica de materiales viales y suelos de subrasante que participan en el diseño de los pavimentos de altos, medios y bajos volúmenes de tránsito

DESCRIPCIÓN: Se recolecta, revisa y procesa información sobre caracterización dinámica de materiales viales, específicamente, acerca del módulo resiliente de suelos en subrasante fina (no tratados) y para suelos de base y subbase no tratados (materiales granulares), además, acerca del módulo dinámico de mezclas asfálticas.

Inicialmente esta recolección de información es acerca de resultados de ensayos de laboratorio de módulo resiliente bajo el protocolo AASHTO T-307, se encuentran en gran cantidad de documentos públicos de diferentes universidades principalmente de Estados Unidos, los cuales son procesados bajo la orientación del ingeniero Eugenio Chavarro Barreto para determinar la ecuación constitutiva en el caso de módulo resiliente y para la determinación de la curva maestra y ecuación sigmoideal de mezclas asfálticas en el caso del módulo dinámico bajo el protocolo AASHTO T-342.

Adicional, se revisan estudios acerca de suelos de subrasante especiales, bajo la orientación de la ingeniera Margarita Polanco, como: suelos colapsables, suelos expansivos, suelos blandos y cenizas volcánicas, ya que de la calidad de la subrasante depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido.



6.2.3 Revisar información bibliográfica sobre la variable materiales y subrasante, caracterización dinámica de materiales y subrasante, módulo resiliente y módulo dinámico para el diseño de pavimentos

DESCRIPCIÓN: A través de las capacitaciones a las cuales se asiste en las aulas de la facultad de ingeniería civil de la Universidad del Cauca, descritas en la actividad ejecutada 6.2.1, se da la oportunidad de conocer métodos para el diseño de pavimentos como: AASHTO 1993, Racional, MEPDG, donde se adquiere conocimiento básico de cada uno de estos.

- ❖ AASHTO 1993: El método de diseño AASHTO, originalmente conocido como AASHO, fue desarrollado en los Estados Unidos en la década de los 60, basándose en un ensayo a escala real realizado durante 2 años en el estado de Illinois, con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-solicitud de las distintas secciones ensayadas. A partir de la versión del año 1986, y su correspondiente versión mejorada de 1993, el método AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que imperaron en el lugar del ensayo original. Éste método introduce el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos como una medida de su capacidad para brindar una superficie lisa y suave al usuario.

- ❖ Racional: Este método de diseño se compone de cuatro características especiales como el tránsito, clima, módulo resiliente de la subrasante y la selección de materiales, este diseño universal de pavimentos comienza proponiendo un modelo estructural, se calculan esfuerzos y deformaciones,



se comparan las sollicitaciones críticas y se obtiene el diseño final. La metodología racional basada en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las interfaces de las capas del pavimento Asfáltico, permiten el diseño óptimo y durable de pavimentos ya que se puede verificar su vida útil con respecto a las admisibilidades propias de cada capa del pavimento. El método hace uso de la teoría de la elasticidad y aplicación de las leyes de fatiga de las capas, integrando los modelos matemáticos de Burmister. A nivel experimental se integra la medición de Módulos Elásticos y Leyes de Fatiga para las capas asfálticas, granulares, y suelos por medio de equipos Triaxiales, el NAT, Nottingham Asphalt Test.

- ❖ **MEPDG:** El procedimiento general de diseño en la Guía Mecanicista Empírica para el Diseño de Pavimentos incluye la comparación de la durabilidad de varias estructuras de prueba con unos criterios de desempeño previamente definidos. Esta comparación se hace durante el periodo de diseño para escoger la mejor alternativa después de un análisis de ciclo de vida y un análisis de constructibilidad. Las propiedades de los materiales se seleccionan a partir de ensayos de laboratorio, correlaciones o valores típicos dependiendo de los niveles jerárquicos definidos por los diseñadores. Las capas de la estructura de los pavimentos flexibles son construidas con diferentes materiales y diferentes tipos de mezclas asfálticas. La durabilidad de las estructuras de pavimento predicha por MEPDG varía con las variaciones de las propiedades de los materiales y la combinación esas propiedades de materiales en las diferentes capas.



6.2.4 Procesar información sobre resultados de ensayos de laboratorio adquiridos en la bibliografía y requeridos para la caracterización dinámica de materiales viales

DESCRIPCIÓN: Se trabaja en el procesamiento de resultados de ensayos de laboratorio adquiridos en la bibliografía bajo la orientación del Ingeniero Eugenio Chavarro Barreto.

Se determina la ecuación constitutiva para suelos de subrasante fina (no tratados) y para suelos de base y subbase no tratados (materiales granulares) de acuerdo a los resultados de ensayos de Módulo Resiliente (se evaluaron en total 33 ensayos de laboratorio).

Se determina la curva maestra de mezclas asfálticas con base en los resultados de ensayos de Módulo Dinámico (se evaluaron en total 30 ensayos de laboratorio), por medio del método gráfico, método analítico, la herramienta IMoDin y el método Solver; se comparan los resultados obtenidos con estos métodos.

A continuación se presentan tres ejemplos de estos procesos ejecutados.

- ❖ **EJEMPLO N°1 SERIE DE PRUEBAS PARA SUELO DE SUBRASANTE FINA (NO TRATADO):** Los módulos resilientes de un suelo para diferentes estados de esfuerzos se estiman usando el Modelo constitutivo universal. Se trabaja con base a los ensayos de laboratorio regidos por la AASHTO T 307-99 (2007).



a. Para suelos finos se recomiendan dos ecuaciones constitutivas, la primera de ellas es el modelo constitutivo universal:

$$M_r = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{K_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{K_3}$$

Los resultados del ensayo de laboratorio adquiridos de la bibliografía se muestran en las tablas N°4, N°5 y N°6:

CLASIFICACIÓN	USCS	AASHTO
	CL-ML Suelo fino limo arcilloso con presencia de granulares	A-4

Tabla N°4. Clasificación del Suelo

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	
ρ (kg/m³)	1835
Humedad (%)	14.5
Estado	Húmedo
% Pasa tamiz #200	56.8
Límite líquido (%)	25
Límite plástico (%)	19
Índice de plasticidad (%)	6
Gravedad específica	2.81
Humedad óptima (%)	10.5
ρ _d máx. (kg/m³)	1927

Tabla N° 5. Características del Suelo



SECUENCIA N°	PRESIÓN DE CONFINAMIENTO σ_3 Kgf/cm ²	ESFUERZO DESVIADOR σ_d Kgf/cm ²	DEFORAMACIÓN UNITARIA ϵ_r	MÓDULO RESILIENTE Kgf/cm ²
1	0,42	0,127	0,0001786	714
2	0,42	0,260	0,0003923	663
3	0,42	0,372	0,0006293	591
4	0,42	0,510	0,0008929	571
5	0,42	0,612	0,0011111	551
6	0,28	0,127	0,0002083	612
7	0,28	0,260	0,0005000	520
8	0,28	0,372	0,0007935	469
9	0,28	0,510	0,0011111	459
10	0,28	0,612	0,0013636	449
11	0,14	0,127	0,0002660	479
12	0,14	0,260	0,0006375	408
13	0,14	0,372	0,0010139	367
14	0,14	0,510	0,0014706	347
15	0,14	0,612	0,0018182	337

Tabla N° 6. Resultados ensayo de módulo resiliente en suelo fino

Para determinar el valor de los parámetros k_1 , k_2 y k_3 , se utiliza el análisis estadístico basado en la regresión lineal múltiple. Se debe resolver transformando la ecuación potencial en una ecuación lineal mediante los logaritmos.

$$\log\left(\frac{Mr}{Pa}\right) = \log K_1 + K_2 * \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + K_3 * \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)$$



Presión de Cámara kgf/cm ²	Esfuerzo Desviador kgf/cm ²	Deformación Unitaria	θ	Mr kgf/cm ²	τ_{oct} kgf/cm ²	LOG(Mr/Pa)	LOG(θ /Pa)	LOG(τ_{oct} /Pa+1)
0.42	0.127	0.0001786	1.3875	714	0.0600873	2.839477	0.1281216	0.0245545
0.42	0.260	0.0003923	1.5200	663	0.1225782	2.8072923	0.1677511	0.048699
0.42	0.372	0.0006293	1.6322	591	0.175455	2.7578069	0.1986721	0.0681302
0.42	0.510	0.0008929	1.7699	571	0.2403494	2.7425669	0.2338381	0.0908473
0.42	0.612	0.0011111	1.8718	551	0.2884192	2.7267727	0.258166	0.1069403
0.28	0.127	0.0002083	0.9675	612	0.0600873	2.7725302	-0.028465	0.0245545
0.28	0.260	0.0005000	1.1000	520	0.1225782	2.7019491	0.0273033	0.048699
0.28	0.372	0.0007935	1.2122	469	0.175455	2.6571367	0.0694726	0.0681302
0.28	0.510	0.0011111	1.3499	459	0.2403494	2.6475914	0.1161878	0.0908473
0.28	0.612	0.0013636	1.4518	449	0.2884192	2.6378316	0.1478153	0.1069403
0.14	0.127	0.0002660	0.5475	479	0.0600873	2.6664768	-0.275744	0.0245545
0.14	0.260	0.0006375	0.6800	408	0.1225782	2.5964389	-0.181574	0.048699
0.14	0.372	0.0010139	0.7922	367	0.175455	2.5506814	-0.115267	0.0681302
0.14	0.510	0.0014706	0.9299	347	0.2403494	2.5258578	-0.045684	0.0908473
0.14	0.612	0.0018182	1.0318	337	0.2884192	2.5128929	-0.000492	0.1069403

Tabla N°7. Parámetro para realizar la regresión lineal múltiple

Los resultados del análisis estadístico de la regresión lineal múltiple se observan a continuación:

Coefficiente de correlación múltiple	0.96756418
Coefficiente de determinación R ²	0.93618043
R ² ajustado	0.92554384
Error típico	0.02743692
Observaciones	15

Tabla N°8. Resultados estadísticos de la regresión lineal múltiple

Los coeficientes del modelo constitutivo determinados para cada espécimen de ensayo deben ser tener un coeficiente de correlación múltiple, r^2 , mayor de 0,90. Si el r^2 para un espécimen de ensayo en particular es menor de 0,90, se deben



verificar los resultados del ensayo y los equipos para encontrar posibles errores. Si no se encuentran errores, se puede considerar el uso de una relación constitutiva diferente.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Grados de libertad		Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0.13251277	0.06625638	88.0150538	6.7565E-08
Residuos	12	0.00903342	0.00075278		
Total	14	0.14154618			

Tabla N°9. Resultados estadísticos de la regresión lineal múltiple

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2.85410876	0.01882657	151.600038	4.5577E-21	2.81308918	2.89512833	2.81308918	2.89512833
Variable X 1	0.60788345	0.05302526	11.4640351	8.0324E-08	0.49235133	0.72341557	0.49235133	0.72341557
Variable X 2	-3.04065496	0.2717944	-11.1873347	1.0521E-07	-3.63284409	-2.44846582	-3.63284409	-2.44846582

Tabla N°10. Resultados estadísticos de la regresión lineal múltiple

Donde,

$$K_1 = 10^{2.85410876} = 714,7$$

$$K_2 = 0,61$$

$$K_3 = -3,04$$

Finalmente, la ecuación constitutiva para este suelo es:

$$M_r = 714,7 * 1,033 \left[\frac{\theta}{1,033} \right]^{0,61} \left[\frac{\tau_{oct}}{1,033} + 1 \right]^{-3,04}$$



b. La segunda ecuación recomendada es:

$$Mr = K_3 \sigma d^{k_4}$$

De la *Tabla N° 6- Resultados ensayo de módulo resiliente en suelo fino*, se obtiene la siguiente gráfica donde, Eje x: Esfuerzo Desviador y Eje y: Módulo Resiliente.

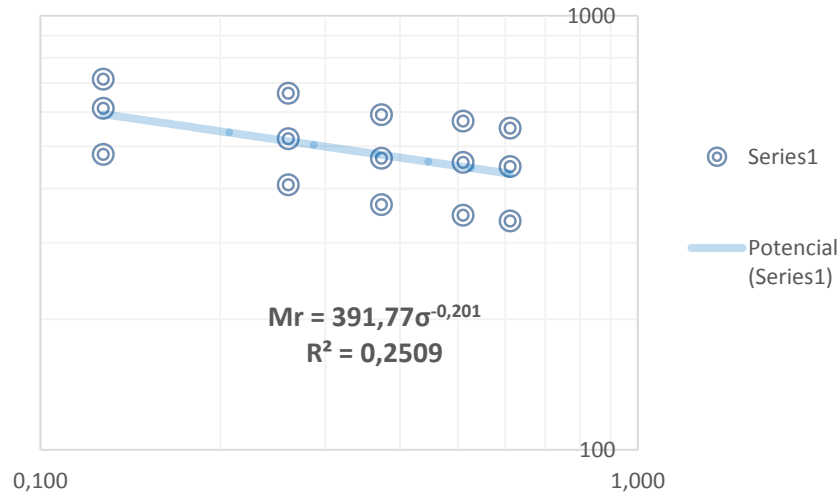


Figura N°9. Doble log

❖ **EJEMPLO N°2 SERIE DE PRUEBAS PARA SUELO DE BASE Y SUBBASE NO TRATADO (MATERIAL GRANULAR)**

a. Para suelos de base y subbase se recomiendan dos ecuaciones constitutivas, la primera de ellas es:

$$M_r = K_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{K_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{K_3}$$



Los resultados del ensayo de laboratorio de Módulo Resiliente adquiridos de la bibliografía se muestran en las tablas N° 11 Y N° 12 y son los siguientes:

CLASIFICACIÓN	
AASHTO	USCS
A-1-a	GW

Tabla N°11. Clasificación del suelo

SECUENCIA N°	PRESIÓN DE CONFINAMIENTO σ_3 Kg/cm ²	ESFUERZO DESVIADOR σ_d Kg/cm ²	DEFORAMACIÓN UNITARIA ϵ_r	MÓDULO RESILIENTE Kg/cm ²
1	0,211	0,190	0,0002213	858
2	0,211	0,380	0,0003624	1048
3	0,211	0,569	0,0004850	1174
4	0,352	0,316	0,0003719	851
5	0,352	0,633	0,0004639	1364
6	0,352	0,949	0,0006459	1469
7	0,703	0,633	0,0003297	1919
8	0,703	1,266	0,0006250	2025
9	0,703	1,898	0,0008710	2179
10	1,055	0,633	0,0002579	2454
11	1,055	0,949	0,0004639	2046
12	1,055	1,898	0,0007459	2545
13	1,406	0,949	0,0003771	2517
14	1,406	1,266	0,0004932	2566
15	1,406	2,531	0,0009160	2763

Tabla N°12. Resultados ensayo de módulo resiliente en suelo de base y subbase



Para determinar el valor de los parámetros k_1 , k_2 y k_3 , se utiliza el análisis estadístico basado en la regresión lineal múltiple. Se debe resolver transformando la ecuación potencial en una ecuación lineal mediante los logaritmos.

$$\log\left(\frac{Mr}{Pa}\right) = \log K_1 + K_2 * \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + K_3 * \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)$$

Presión de Cámara kgf/cm ²	Esfuerzo Desviador kgf/cm ²	Deformación Unitaria	θ	Mr kgf/cm ²	τ_{oct} kgf/cm ²	LOG(Mr/Pa)	LOG(θ /Pa)	LOG(τ /Pa+1)
0,211	0,190	0,0002213	0,8226	858	0,0895	2,91925	-0,099	0,03608
0,211	0,380	0,0003624	1,0124	1048	0,179	3,00608	-0,009	0,06939
0,211	0,569	0,0004850	1,2022	1174	0,2685	3,05561	0,0659	0,10033
0,352	0,316	0,0003719	1,3710	851	0,1491	2,91568	0,1229	0,05857
0,352	0,633	0,0004639	1,6874	1364	0,2983	3,12069	0,2131	0,11017
0,352	0,949	0,0006459	2,0037	1469	0,4474	3,15304	0,2877	0,15629
0,703	0,633	0,0003297	2,7420	1919	0,2983	3,26905	0,424	0,11017
0,703	1,266	0,0006250	3,3747	2025	0,5966	3,29228	0,5141	0,19797
0,703	1,898	0,0008710	4,0075	2179	0,8949	3,32425	0,5888	0,27098
1,055	0,633	0,0002579	3,7966	2454	0,2983	3,37572	0,5653	0,11017
1,055	0,949	0,0004639	4,1130	2046	0,4474	3,29678	0,6001	0,15629
1,055	1,898	0,0007459	5,0621	2545	0,8949	3,3916	0,6902	0,27098
1,406	0,949	0,0003771	5,1676	2517	0,4474	3,38677	0,6992	0,15629
1,406	1,266	0,0004932	5,4839	2566	0,5966	3,39518	0,725	0,19797
1,406	2,531	0,0009160	6,7495	2763	1,1931	3,42728	0,8152	0,33345

Tabla N°13. Parámetro para realizar la regresión lineal múltiple

Los resultados del análisis estadístico de la regresión lineal múltiple se observan a continuación:



Coeficiente de correlación múltiple	0,9668328
Coeficiente de determinación R ²	0,93476566
R ² ajustado	0,92389327
Error típico	0,04944339
Observaciones	15

Tabla N°14. Resultados estadísticos de la regresión lineal múltiple

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Grados de libertad		Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,420362811	0,210181406	85,97609761	7,70651E-08
Residuos	12	0,029335791	0,002444649		
Total	14	0,449698603			

Tabla N°15. Resultados estadísticos de la regresión lineal múltiple

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,9819	0,0273	109,1520	0,0000	2,9224	3,0414	2,9224	3,0414
Variable X 1	0,5997	0,0776	7,7248	0,0000	0,4305	0,7688	0,4305	0,7688
Variable X 2	-0,0513	0,2679	-0,1914	0,8514	-0,6350	0,5324	-0,6350	0,5324

Tabla N°16. Resultados estadísticos de la regresión lineal múltiple

Donde,

$$K_1 = 10^{2,98191397215503} = 959,2$$

$$K_2 = 0,59$$

$$K_3 = -0,05$$

Finalmente, la ecuación constitutiva para este suelo es:



$$M_r = 959,2 * 1,033 \left[\frac{\theta}{1,033} \right]^{0,59} \left[\frac{\tau_{oct}}{1,033} + 1 \right]^{-0,05}$$

b. La segunda ecuación recomendada es:

$$M_r = K_1 \theta^{K_2}$$

Se representan en las figuras N°10 y N°11 el comportamiento del módulo resiliente.

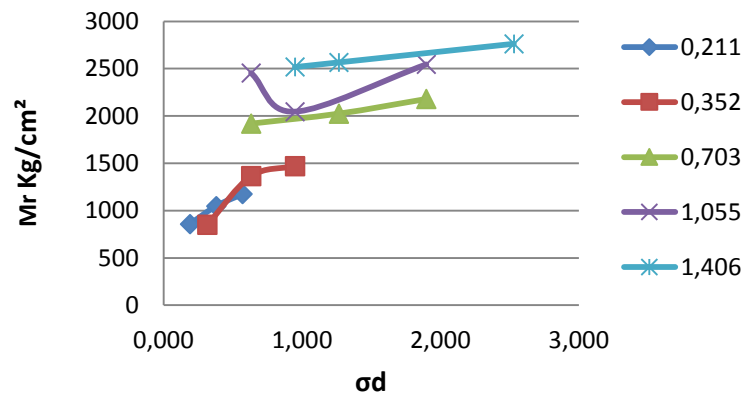


Figura N°10. Esfuerzo desviador vs. Módulo resiliente

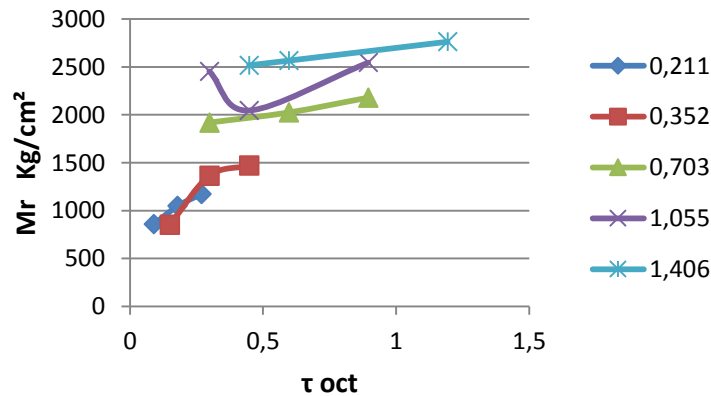


Figura N°11. Esfuerzo Octaédrico vs. Módulo resiliente

Finalmente, la ecuación constitutiva es $Mr = 965,53\theta^{0,5875}$ ver figura N°12.

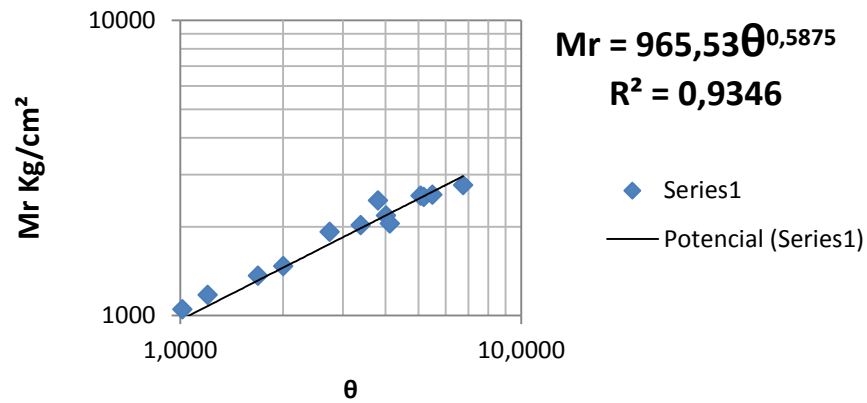


Figura N°12. Primer invariante de tensiones vs. Módulo resiliente

Además, se obtiene la gráfica en 3D, donde se muestra como varía el módulo resiliente con respecto al esfuerzo octaédrico y el invariante de tensiones.

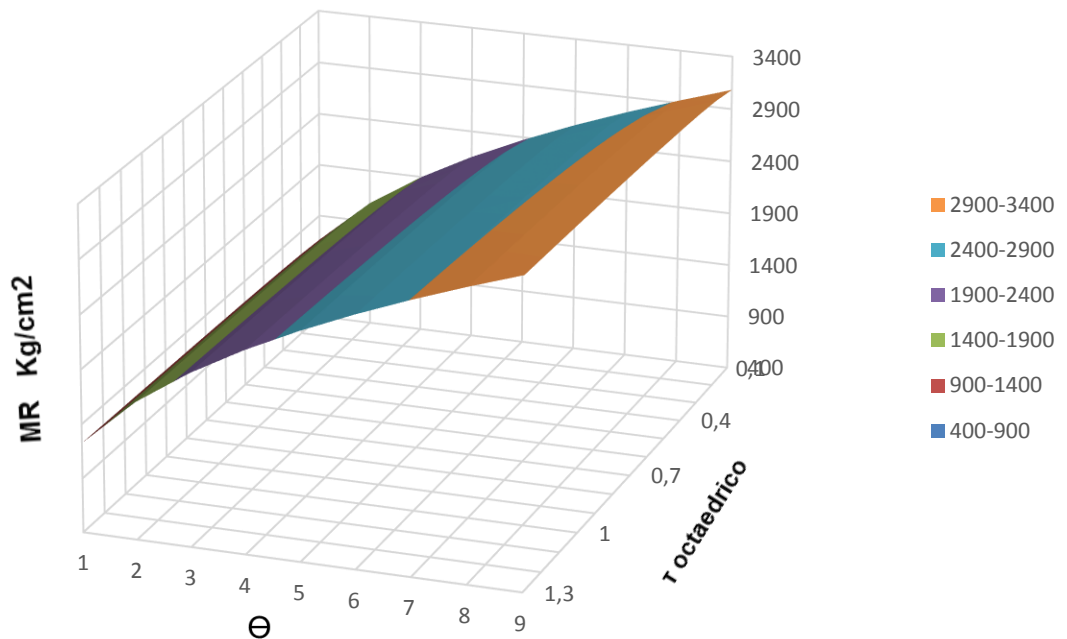


Figura N° 13. Gráfica 3D



Se elabora el mismo procedimiento para los 33 resultados de ensayos de laboratorio de suelos obtenidos de la bibliografía, se resumen en la siguiente tabla:

Ensayo N°	Clasificación AASHTO	K ₁	K ₂	K ₃	R ²
1	A-1-a	959,21	0,60	-0,05	0,92
2		571,20	0,28	1,04	0,83
3		1029,19	0,40	-0,06	0,87
4		823,13	0,35	0,40	0,92
5		734,99	-0,19	0,34	0,25
6		1776,08	-1,46	3,05	0,94
7		503,23	0,82	0,13	0,99
8		842,61	0,64	0,11	0,96
9	A-1-b	802,65	0,40	-1,59	0,90
10	A-2-4	1160,10	0,45	-1,67	0,93
11		1012,17	0,43	-0,91	0,77
12		948,20	0,67	-2,20	0,90
13		2013,05	0,71	-2,00	0,97
14	A-2-6	2398,46	0,87	-2,71	0,95
15		1275,23	0,31	-0,16	0,83
16	A-2-7	827,28	0,26	-1,03	0,84
17		751,16	0,28	-0,92	0,91
18	A-4	1281,32	0,26	-1,22	0,97
19		1016,94	0,42	-2,06	0,90
20		714,68	0,61	-3,04	0,93
21		975,52	0,50	-2,43	0,92
22		1000,91	0,39	-2,41	0,94
23		315,91	-0,09	-1,26	0,36
24		935,60	0,18	-1,83	0,77
25		442,32	0,06	-1,07	0,45
26		325,79	0,02	-1,52	0,45
27		665,79	0,32	-1,92	0,80
28	421,65	-0,11	-0,61	0,47	
29	1965,54	0,92	-2,48	0,97	
30	1560,67	0,61	-1,99	0,92	
31	A-6	1200,47	0,23	-1,37	0,96
32		254,21	0,81	-4,09	0,74
33		200,74	0,63	-3,28	0,75



❖ **EJEMPLO N°3 DETERMINACIÓN DE LA CURVA MAESTRA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON BASE EN LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO:**

Siguiendo el protocolo de las normas se puede obtener la curva maestra, por medio de cuatro diferentes métodos: método gráfico, método analítico, método IModín y método solver, finalmente se comparan los resultados obtenidos por cada uno de los métodos.

a. *MÉTODO GRÁFICO*

Del ensayo de laboratorio se obtiene como resultado el módulo dinámico E^* (kg/cm^2) a diferentes temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) y variadas frecuencias (Hz), ver Tabla N°17; siendo éste un método con resultados muy aproximados con respecto a los otros que se desarrollan.



TEMPERATURA (°C)	FRECUENCIA (Hz)	MÓDULO DINÁMICO E* (Kg/cm ²)	T(S)	LOG(T)	FACTOR DE AJUSTE	LOG(T) CORREGIDO
-12,2	0,1	137176	10	1	-4,5	-3,5
-12,2	0,5	155720	2	0,30103	-4,5	-4,2
-12,2	1	162802	1	0	-4,5	-4,5
-12,2	5	177113	0,2	-0,69897	-4,5	-5,2
-12,2	10	182392	0,1	-1	-4,5	-5,5
-12,2	25	188608	0,04	-1,39794001	-4,5	-5,9
4,4	0,1	51541	10	1	-2,1	-1,1
4,4	0,5	72806	2	0,30103	-2,1	-1,8
4,4	1	82571	1	0	-2,1	-2,1
4,4	5	105544	0,2	-0,69897	-2,1	-2,8
4,4	10	115230	0,1	-1	-2,1	-3,1
4,4	25	127562	0,04	-1,39794001	-2,1	-3,5
21,1	0,1	10890	10	1	0	1,0
21,1	0,5	19842	2	0,30103	0	0,3
21,1	1	25045	1	0	0	0,0
21,1	5	40411	0,2	-0,69897	0	-0,7
21,1	10	48353	0,1	-1	0	-1,0
21,1	25	59867	0,04	-1,39794001	0	-1,4
37,8	0,1	2050	10	1	1,6	2,6
37,8	0,5	4253	2	0,30103	1,6	1,9
37,8	1	5767	1	0	1,6	1,6
37,8	5	11248	0,2	-0,69897	1,6	0,9
37,8	10	14682	0,1	-1	1,6	0,6
37,8	25	20410	0,04	-1,39794001	1,6	0,2
54,4	0,1	523	10	1	2,9	3,9
54,4	0,5	1061	2	0,30103	2,9	3,2
54,4	1	1454	1	0	2,9	2,9
54,4	5	3034	0,2	-0,69897	2,9	2,2
54,4	10	4145	0,1	-1	2,9	1,9
54,4	25	6194	0,04	-1,39794001	2,9	1,5

Tabla N°17. Resultados ensayo laboratorio módulo dinámico y procesamiento

Se determina el tiempo total de carga:

$F = \frac{1}{T}$; Por lo tanto $T = \frac{1}{F}$, además se registra el logaritmo del tiempo total de carga LOG (T), ver Tabla N°17.



A continuación se grafican las curvas isotérmicas, ver Figura N°14; para determinar el factor de ajuste parcial gráficamente de cada curva isotérmica se requiere de la Figura N°15 para ponerlas en función a la curva base a una temperatura de $T_e = 21,1^\circ \text{C}$.

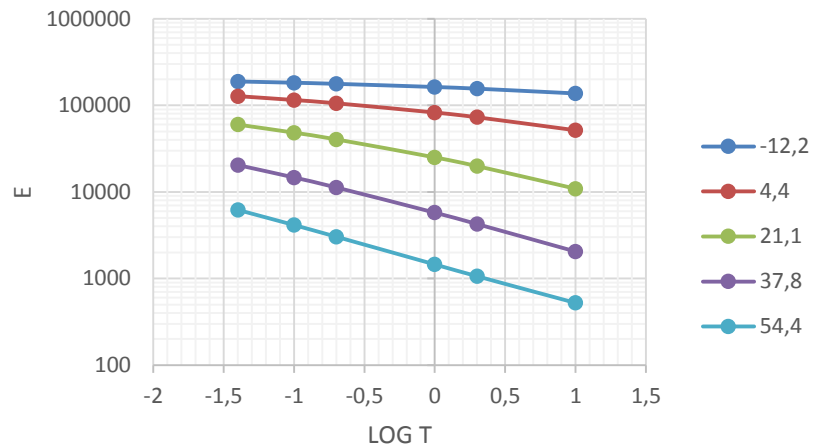


Figura N° 14. Curvas isotérmicas, LOG (T) vs. RIGIDEZ

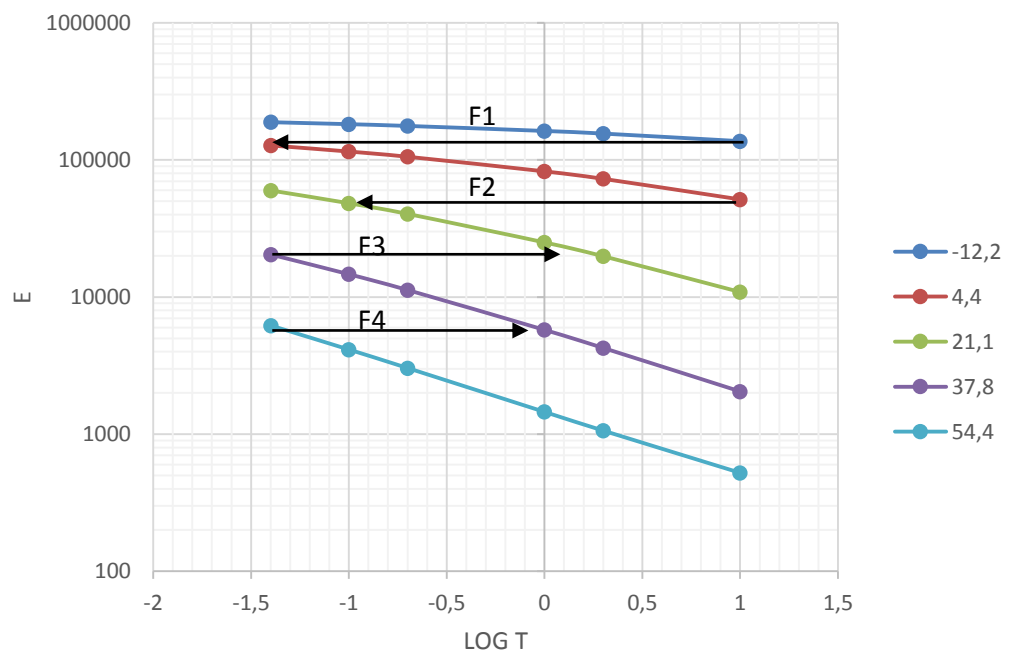


Figura N° 15. Curvas isotérmicas y factor de ajuste



De la Figura N°15 se obtienen los factores de ajuste para que cada curva isotérmica quede en función de la curva base de temperatura $T = 21,1^{\circ}\text{C}$, ver Tabla N°18.

CURVA	T °C	FACTOR AJUSTE	FACTOR AJUSTE
1	-12,2	F1+F2	reemplazando $-2,4 + -2,1 = -4,5$
2	4,4	F2	-2,10
3	21,1	0	0,00
4	37,8	F3	1,60
5	54,4	F4+F3	reemplazando $1,3 + 1,6 = 2,9$

Tabla N°18. Factor de ajuste de cada curva isotérmica en función de la curva base

Se registran los valores de cada factor de ajuste, como se observa en la Tabla N°17, y se calcula el logaritmo del tiempo corregido para la curva de referencia:

$$\text{LOG}(T) \text{ corregido} = \text{LOG}(T) + \text{factor de ajuste}$$

De esta manera se construye la curva maestra para la temperatura base y curva maestra de referencia, ver Figura N°16 y N°18 respectivamente.

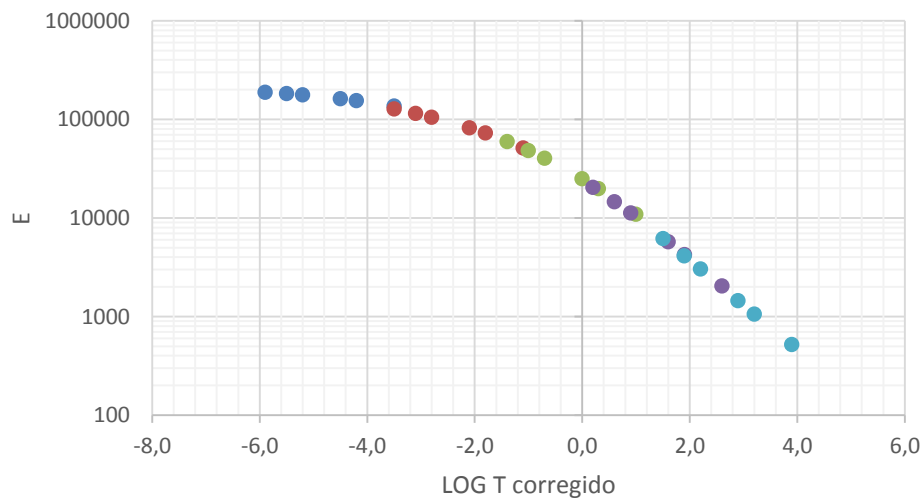


Figura N° 16. Curva ajustada $T_e=21,1^{\circ}\text{C}$ obtenida con el método gráfico



Adicional se obtiene la curva maestra de referencia, ver Figura N°18, trazando una paralela y encontrando los nuevos valores de los factores de ajuste con la ecuación de la curva paralela como se muestra en la Figura N° 17, así:

TEMPERATURA DE REFERENCIA T = 30°C
FACTORES DE AJUSTE
-5,959848
-3,332732
-1,079067
0,784152
2,249268

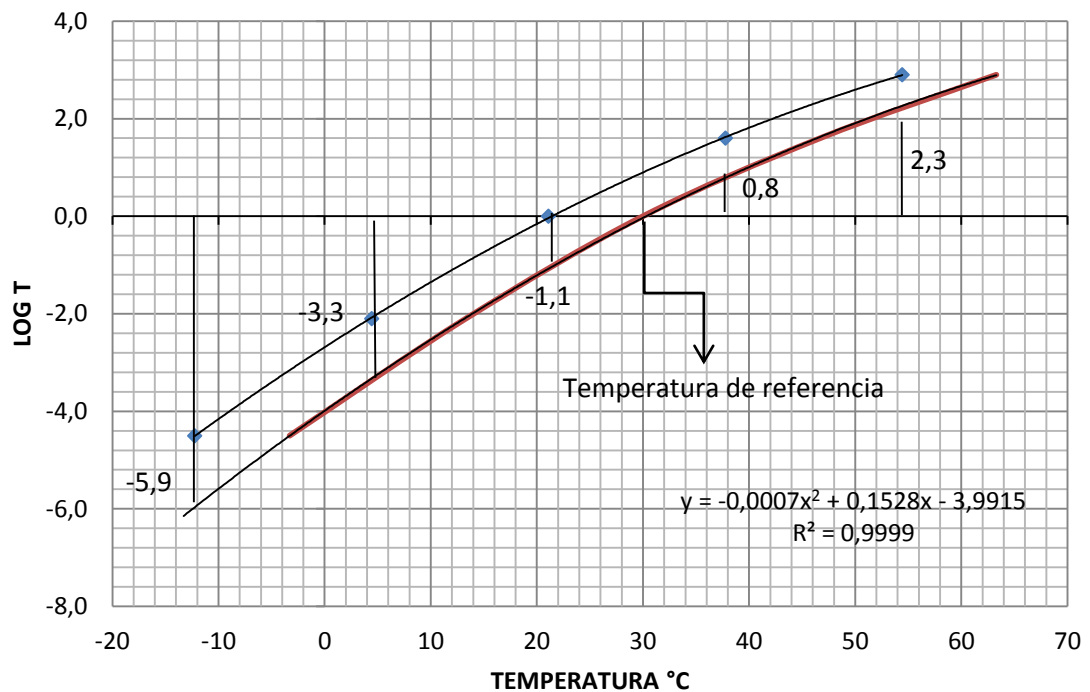


Figura N° 17. Curva paralela con factores de ajuste

Finalmente, se obtiene la curva maestra ajustada a la temperatura de referencia o diseño, en este caso T= 30°C, ver Figura N°18

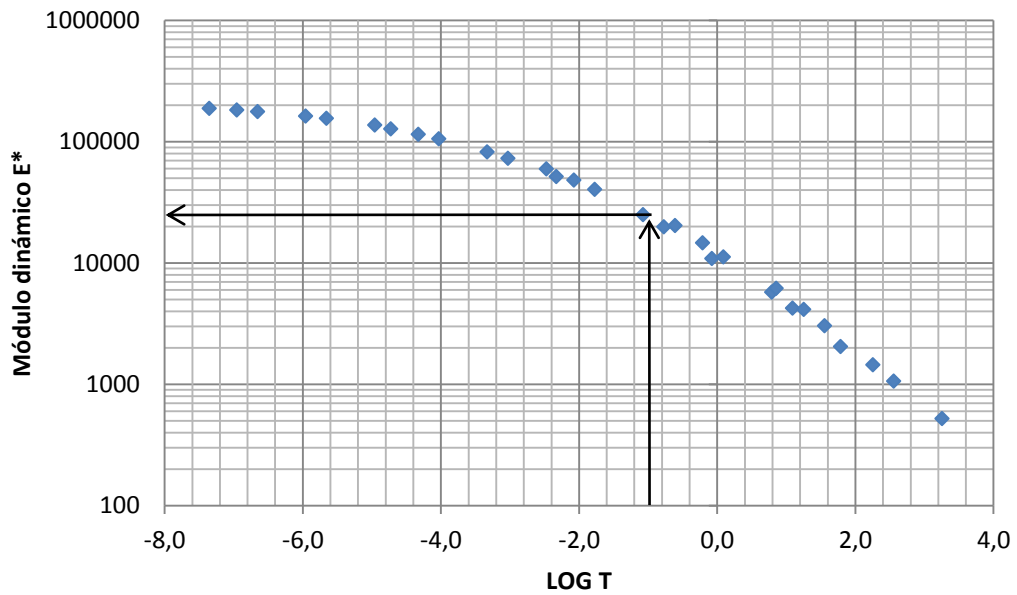


Figura N°18. Curva maestra de referencia obtenida con el método gráfico

Como aplicación, se entra a la curva con un LOG T = -1,02 y se obtiene el Módulo Dinámico a una velocidad específica y con un espesor probable:

Espesor (cm)	10	Frecuencia (Hz)	10,6
Velocidad (Km/h)	60	LOG T	-1,02
Método gráfico E* (Kg/cm ²) ≈			24980

b. MÉTODO ANALÍTICO

Como segunda opción, para mayor exactitud, se obtiene la curva maestra por medio de las líneas de tendencia de cada curva isotérmica con sus respectivas ecuaciones como se muestra en la Figura N°19, las líneas que más se ajustan a cada curva son las polinómicas de tercer orden, además se tiene un $r^2= 1$, lo cual indica que no hay dispersión.

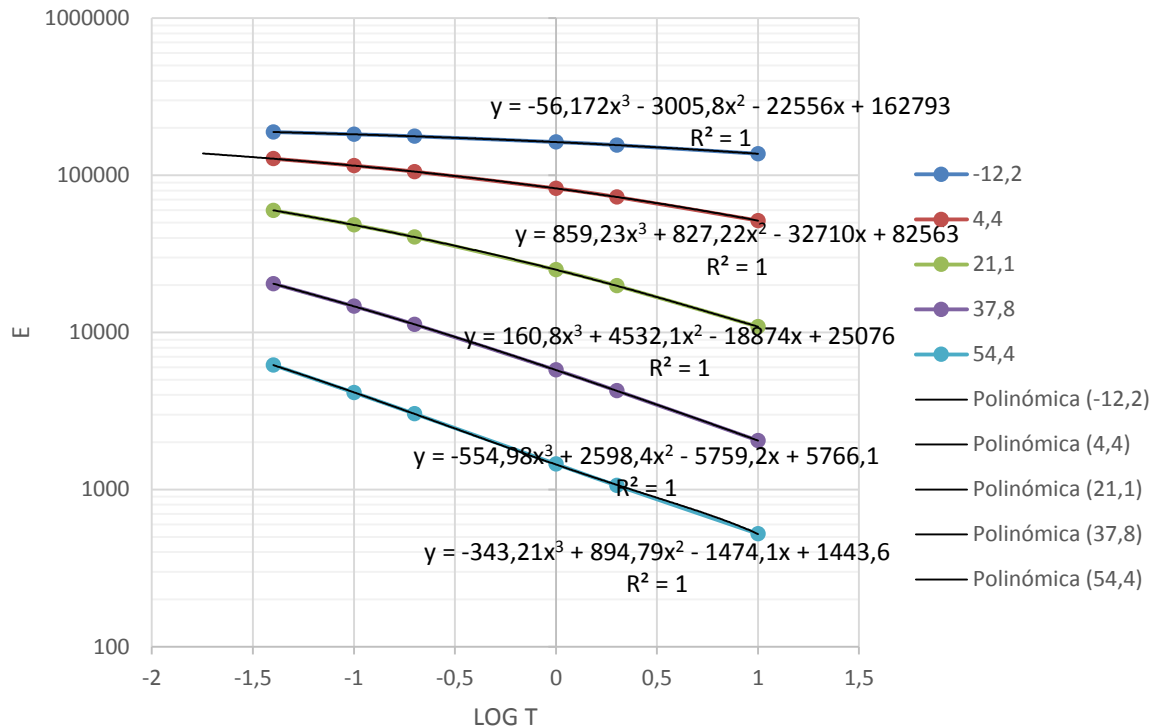


Figura N°19. Ecuación de cada curva isotérmica

Para encontrar el factor de ajuste con este método es necesario reemplazar el valor de la coordenada Y de las curvas isotérmicas en las ecuaciones más próximas hasta llegar a la ecuación de la curva base (T=21,1°C) y así saber exactamente en qué lugar tienen el mismo módulo dinámico, así pues, se itera y se conoce su ubicación en la coordenada X, ver Tabla N°19. Lo anterior se explica numéricamente así:

Factor de ajuste de la curva isotérmica T= -12,2 °C:

- $137175,028 = 859,23x^3 + 827,22x^2 - 32710x + 82563$, despejando $X = -1,73$
- $51539,45,50 = 160,8x^3 + 4532,1x^2 - 18874x + 25076$, despejando $X = -1,12$

Por lo tanto el factor de ajuste es $= (-1 + (-1,73)) + (-1,12 + (-1)) = -4,85$



CURVA	T °C	Y	X	FACTOR DE AJUSTE
1	-12,2	137175,028		-4,850
2	4,4	51539,45	-1,730	-2,12
3	21,1	59941,2808	-1,12	0
3	21,1	10894,9	0,26	0
4	37,8	20444,70912	-0,073	1,66
5	54,4	6202,89664		2,987

Tabla N°19. Factor de ajuste de cada curva isotérmica en función de la curva base

Una vez encontrados los valores de cada factor de ajuste se grafica el LOG (T) corregido vs. Módulo dinámico E*, y se obtiene la Figura N°20.

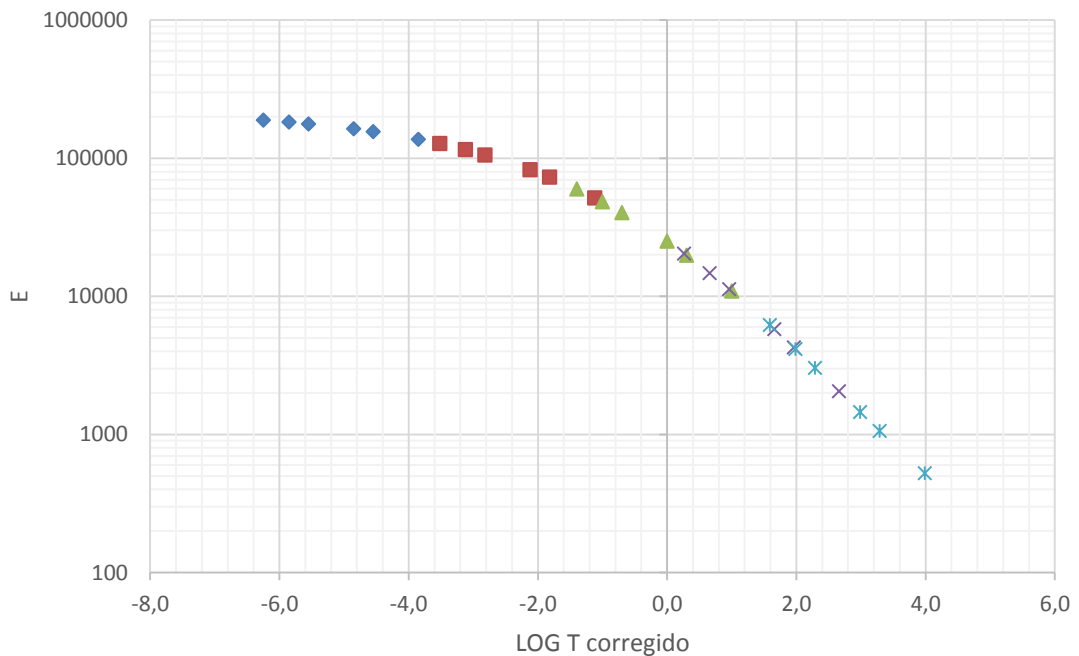


Figura N°20. Curva ajustada $T_e=21,1^{\circ}\text{C}$ obtenida con el método analítico

Adicional se obtiene la curva maestra de referencia, ver Figura N°22, trazando una paralela y encontrando los nuevos valores de los factores de ajuste con la ecuación de la curva paralela como se muestra en la Figura N° 21, así:



TEMPERATURA DE REFERENCIA T = 30°C
FACTORES DE AJUSTE
-6,55603124
-3,48482208
-1,081073345
0,77409876
2,21269792

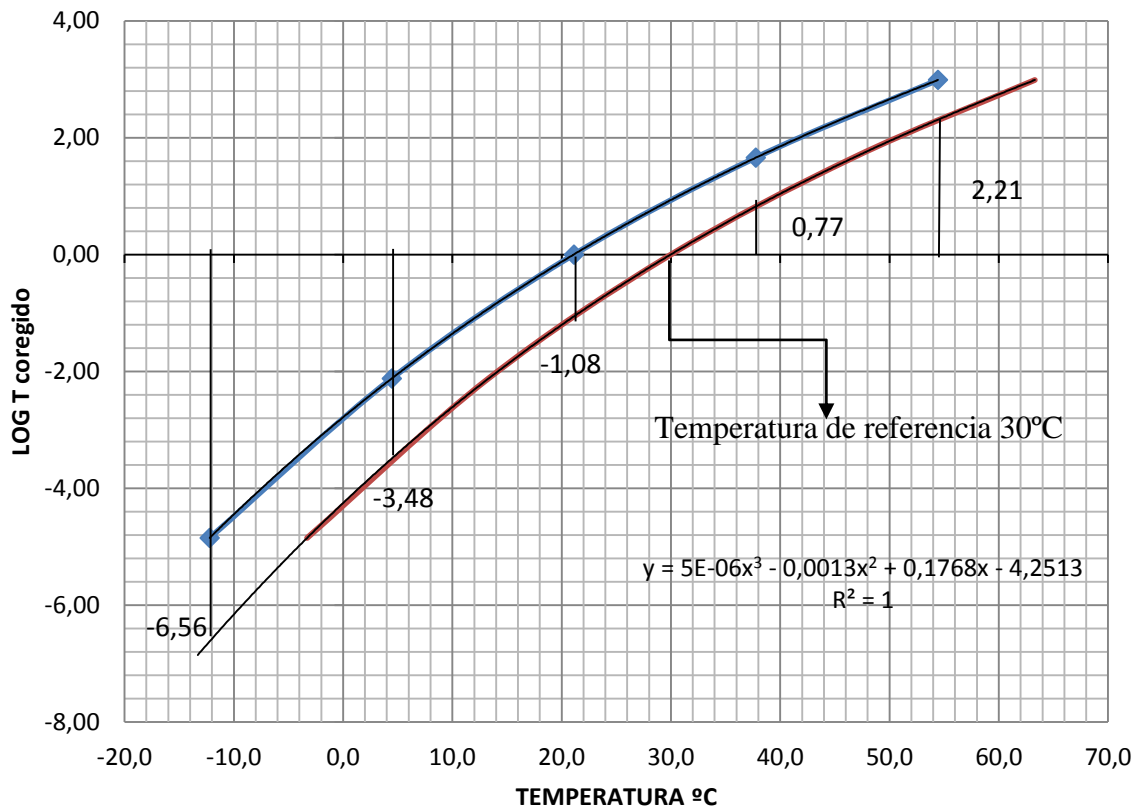


Figura N° 21. Curva paralela con factores de ajuste

Finalmente, se obtiene la curva maestra ajustada a la temperatura de referencia o diseño, en este caso T= 30°C, ver Figura N°22.

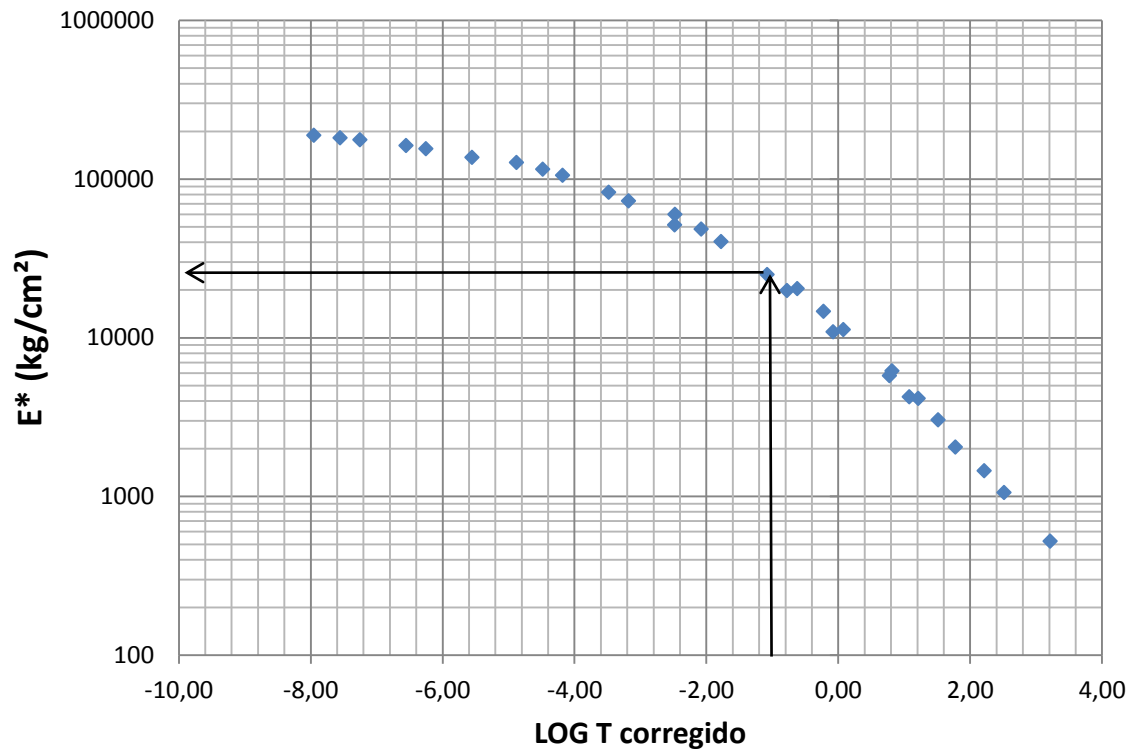


Figura N°22. Curva maestra de referencia obtenida con el método analítico

Como aplicación, se entra a la curva con un LOG T = -1,02 y se obtiene el Módulo Dinámico a una velocidad específica y con un espesor probable:

Espesor (cm)	10	Frecuencia (Hz)	10,6
Velocidad (Km/h)	60	LOG T	-1,02
Método analítico E* (Kg/cm²)≈			24942

c. *MÉTODO IModin*

Como tercera opción se determina la curva maestra con la herramienta IModin, el programa utiliza las siguientes unidades: T= °F y E*= ksi.



TEMPERATURA (°F)	FRECUENCIA (Hz)	MÓDULO (ksi)	ÁNGULO DE FASE (°)
10	25	2683	3,4
10	10	2594	4,6
10	5	2519	5,2
10	1	2316	6
10	0,5	2215	6,4
10	0,1	1951	7,8
40	25	1814	8,3
40	10	1639	9,1
40	5	1501	10,2
40	1	1174	11,9
40	0,5	1036	13
40	0,1	733	16,2
70	25	852	23
70	10	688	24,4
70	5	575	23,8
70	1	356	26,2
70	0,5	282	27,8
70	0,1	155	30,5
100	25	290	30,5
100	10	209	38,7
100	5	160	32,5
100	1	82	37,2
100	0,5	60	38,4
100	0,1	29	36,4
130	25	88	30,2
130	10	59	28,6
130	5	43	23,6
130	1	21	20,1
130	0,5	15	17,5
130	0,1	7	12,3

Tabla N° 20. Formato para introducir datos a IModin

Como resultado se obtiene la curva maestra de la Figura N°23, además, el módulo dinámico de acuerdo a los requerimientos:

Espesor (cm)	10	Frecuencia (Hz)	10,6
Velocidad (Km/h)	60	T (°C)	30
Resultado IModin E* (Kg/cm ²)=			26429

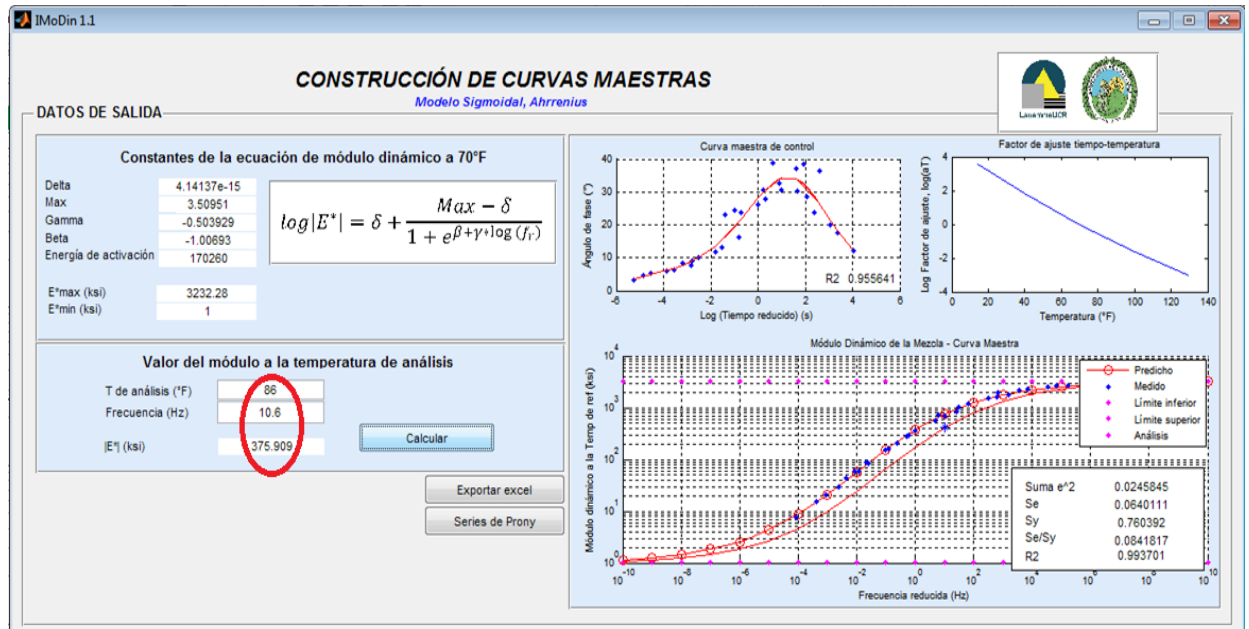


Figura N°23. Salida de la interfaz

El programa IMoDin utiliza la siguiente ecuación:

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(fr)}}$$

Donde,

$|E^*|$: Módulo dinámico

fr : Frecuencia de carga a la temperatura de referencia.

δ : Valor del módulo mínimo.

$\delta + \alpha$: Valor del módulo máximo.

β y γ : Parámetros que describen la forma de la curva sigmoideal.



Por último, los resultados obtenidos por el programa IMoDin son exportados a Excel, ver Tablas N°21 y N°22

CURVA MAESTRA PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS			
Log(fred), Hz	Log(Epred), ksi	Epred, ksi	fred, Hz
-10	0,0611474	1,15119103	1E-10
-9	0,10006954	1,25912701	1E-09
-8	0,16259858	1,45411443	0,00000001
-7	0,26120589	1,82476058	0,0000001
-6	0,41224751	2,58373228	0,000001
-5	0,63359269	4,30123025	0,00001
-4	0,93779882	8,66560363	0,0001
-3	1,32097518	20,9399276	0,001
-2	1,75393654	56,7461682	0,01
-1	2,18699748	153,814573	0,1
0	2,57042816	371,9017	1
1	2,87494739	749,803382	10
2	3,09658228	1249,05707	100
3	3,24785153	1769,50392	1000
4	3,34662055	2221,36817	10000
5	3,4092575	2566,00499	100000
6	3,44824891	2807,04201	1000000
7	3,47224085	2966,47606	10000000
8	3,48689809	3068,30189	100000000
9	3,4958134	3131,93979	1000000000
10	3,50122174	3171,18616	1E+10

Tabla N°21. Salida de la interfaz en Excel

CONSTANTES DE LA CURVA MAESTRA				
Delta	Alfa	Gamma	Beta	Energía de activación
4,14137E-15	3,509508394	-0,50392939	-1,00692684	170259,5368
Error^2	Se	Sy	Se/Sy	R^2
0,024584489	0,064011052	0,760391806	0,08418167	0,993700841

Tabla N°22. Constantes de la curva maestra en Excel

En la Figura N°24 se muestra la curva maestra obtenida de los datos exportados a Excel desde IModin, graficando fred (Hz) vs. epred (KSI).

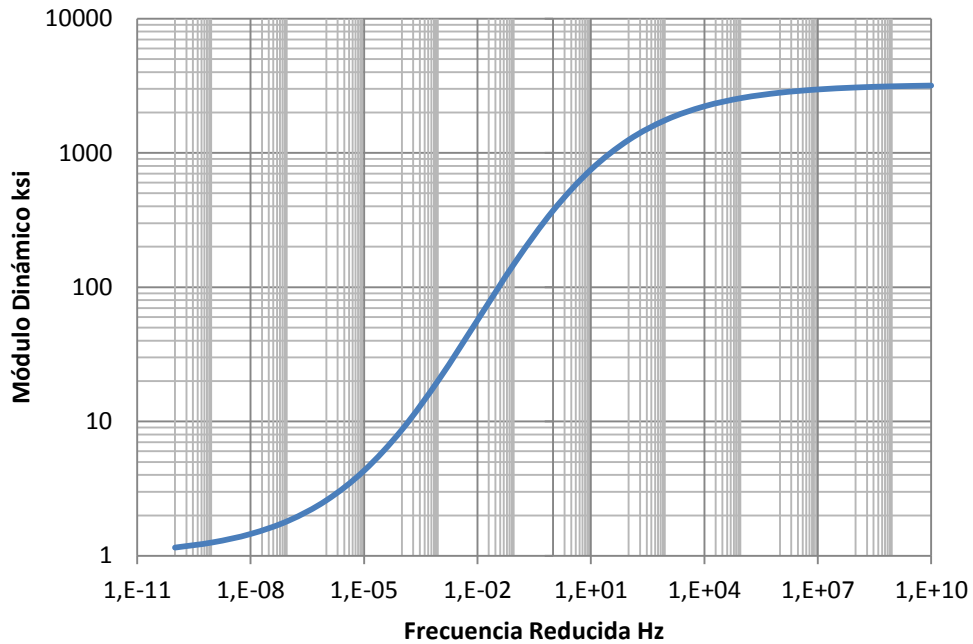


Figura N° 24. Curva maestra obtenida con el método IModin

d. MÉTODO SOLVER

Como cuarta opción se determina la curva maestra a una temperatura de referencia específica con el método utilizado por el ingeniero Eugenio Chavarro, en el cual se soluciona el ejemplo por medio de la herramienta SOLVER de Excel; se introducen los valores de LOG T ajustados a la temperatura de referencia (30°C), los valores de módulo dinámico (kg/cm²), ver tabla N° 23, el espesor probable del pavimento (cm) y la frecuencia (Hz).



LOG(T) CORREGIDO	MÓDULO (Kg/cm ²)
-5,56	137176
-6,26	155720
-6,56	162802
-7,26	177113
-7,56	182392
-7,95	188608
-2,48	51541
-3,18	72806
-3,48	82571
-4,18	105544
-4,48	115230
-4,88	127562
-0,08	10890
-0,78	19842
-1,08	25045
-1,78	40411
-2,08	48353
-2,48	59867
1,77	2050
1,08	4253
0,77	5767
0,08	11248
-0,23	14682
-0,62	20410
3,21	523
2,51	1061
2,21	1454
1,51	3034
1,21	4145
0,81	6194

Tabla N°23. Datos a introducir en el programa



Se calcula el valor del módulo dinámico con la ayuda de la herramienta de Excel SOLVER, se obtiene la figura N°25 ($X = \text{LOG } T$; $Y = E^*$), la ecuación utilizada es:

$$\log(|E^*|) = d + \frac{a}{1 + e^{b + c \log(1/F)}}$$

Donde,

$$a = 4,73547$$

$$b = -0,97713$$

$$c = 0,37740$$

$$d = 0,62383$$

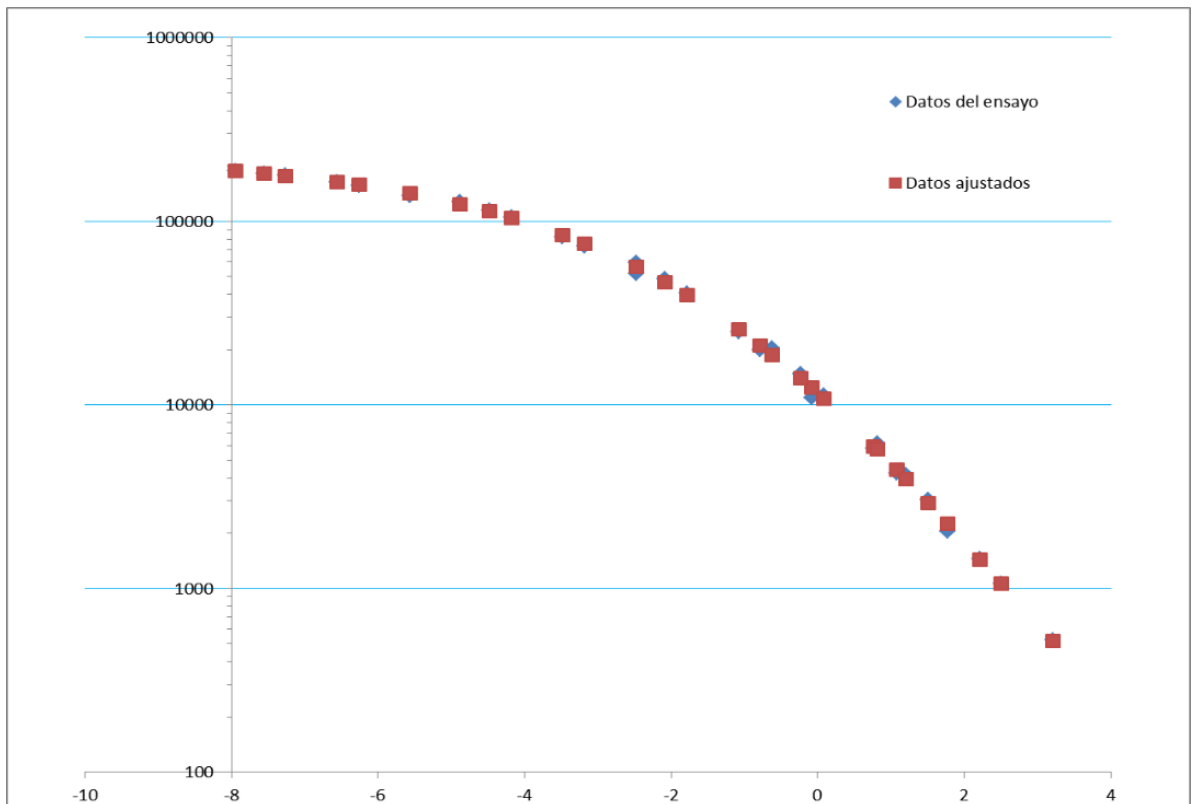


Figura N°25. Curva maestra obtenida con el método Solver



Espesor (cm)	10	Frecuencia (Hz)	10,6
Velocidad (Km/h)	60	R ²	0,999
Resultado SOLVER E* (Kg/cm ²)=			24833

e. *RESULTADOS*

Una vez resuelto el ejercicio por medio de los cuatro métodos se puede comparar el resultado obtenido con cada uno de ellos, ver tabla N° 24, son resultados similares con lo cual concluye que todos son válidos y se pueden utilizar con seguridad.

MÉTODO	MÓDULO DINÁMICO E* (Kg/cm ²)
Gráfico	24980
Analítico	24942
IMoDin	26429
SOLVER	24833

Tabla N°24. Resultados obtenidos con todos los métodos



6.2.5 Manejar programas de computador requeridos para el análisis estructural de pavimentos

DESCRIPCIÓN: Las capacitaciones orientadas por los ingenieros asesores nacionales e internacionales, en el desarrollo del manual de diseño de pavimentos flexibles, permitieron ampliar el conocimiento acerca de herramientas para el diseño de pavimentos, tales como, el SOFTWARE MEPDG, AASHTO 93, el MÉTODO RACIONAL, se describe a groso modo el manejo de cada programa.

- ❖ El procedimiento para el uso del MEPDG es el siguiente:
 - a. Entrada: Se aporta información del tránsito, fundación, clima y propiedades de materiales.
 - b. Análisis: Estrategia de diseño de prueba, modelos de análisis de pavimento, modelos de predicción de fallas, daño acumulado y verificación de satisfacción de condiciones de diseño.
 - c. Selección de estrategias: Alternativas viables, procedimientos constructivos y análisis de ciclo de vida.
 - d. El resultado del MEPDG es predecir los deterioros y fallas y el IRI (regularidad superficial) al nivel de confiabilidad deseado. Por lo tanto, no es un procedimiento directo de diseño de espesores, sino más bien una herramienta de análisis para que el diseñador la use de manera iterativa.



- ❖ AASHTO 93 es una metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente. Este método de diseño desarrollado a finales de los años 50 ha sufrido varias modificaciones en sus guías de diseño, siendo la versión del año 1993 la que se emplea actualmente para el diseño de pavimentos. El procedimiento de diseño es el siguiente:
 - a. Cálculo del tráfico de diseño.
 - b. Determinación del módulo resiliente efectivo de diseño.
 - c. Cálculo del número estructural.
 - d. Cálculo de los espesores de diseño.

- ❖ MÉTODO RACIONAL consta de los siguientes pasos para el diseño del pavimento flexible:
 - a. Determinar la variable tránsito.
 - b. Determinar la variable clima.
 - c. Caracterización dinámica de materiales.
 - d. Determinar modelo estructural.
 - e. Calcular esfuerzos y deformaciones.
 - f. Determinar esfuerzos y deformaciones admisibles.
 - g. Comparar solicitaciones críticas.
 - h. Determinar la estructura diseñada.



7 CONCLUSIONES

Al cumplirse con todos los objetivos planteados durante el desarrollo de esta pasantía se llega principalmente a las siguientes conclusiones:

- ❖ Se aplicaron los conceptos básicos de pavimentos adquiridos durante la formación académica en la facultad de ingeniería los cuales sirvieron para entender lo esencial de lo que se realizó en la pasantía, además, se conocieron algunos desarrollos tecnológicos para el dimensionamiento moderno de los pavimentos y de esta manera se visualizó el avance al que se puede llegar siendo constantes en cuando a investigaciones y nuevas formas de percibir teorías existentes.
- ❖ Durante el desarrollo del contrato se participó en el grupo de materiales viales y suelos de subrasante por medio de la asistencia a las diferentes capacitaciones, donde se socializó con ingenieros que aportaron a la elaboración de los manuales debido a su experiencia profesional, además se aprendió más acerca de la importancia de estas variables para el diseño de pavimentos flexibles y el papel que juegan en el mismo.
- ❖ De acuerdo con la revisión de la información bibliográfica, sobre la caracterización dinámica de materiales viales y suelos de subrasante, módulo resiliente y módulo dinámico, se amplió el campo de conocimientos en cuanto a la aplicación de los mismos en el diseño de pavimentos; y por medio de la gran cantidad de resultados de ensayos de laboratorio procesados se profundizó en el desarrollo y utilización de las metodologías.



- ❖ Se concluye que manejar programas de computador es indispensable debido a que son requeridos para el análisis estructural de pavimentos, proponiendo, precisamente, un modelo estructural; estos programas permiten que el diseño de pavimentos sea óptimo y durable ya que se puede verificar su vida útil, además, se comprendió lo conveniente que es actualizarse constantemente acerca de nuevas herramientas y avances tecnológicos para progresar en el diseño de pavimentos.

- ❖ Como experiencia personal se adquirió una formación íntegra durante el desarrollo de este proyecto ya que se brindó la posibilidad de extender perspectivas que enriquecieron no solo la parte académica y teórica, sino también la parte social, debido a que el aprendizaje alcanzado fue muy satisfactorio, dando lugar a ser futura Ingeniera Civil capaz de servir a la comunidad y de una u otra manera mejorar su calidad de vida.



8 BIBLIOGRAFÍA

ALVARES PABÓN, J. *Estabilización de subrasantes*. Instituto colombiano de productores de cemento.

BENAVIDES BASTIDAS, C. (2014). *Caracterización dinámica de materiales*. Clase Pavimentos. Universidad del Cauca.

BENNERT, T. y McCarthy, L., (2012). *Comparing HMA Dynamic Modulus Measured by Axial Compression and IDT Methods*. NCHRP Transportation Research Board of the National Academies.

CHAVARRO BARRETO, E. (2015). *Mezclas asfálticas*. Guía. Universidad del Cauca.

CORDO, O., (2014). "Análisis del ahuellamiento según método MEPDG. Aplicación al diseño de pavimentos nuevos y refuerzos" en *Congreso argentino de vialidad y tránsito*. Buenos Aires, Argentina.

GARNICA, P., GÓMEZ, J. y PÉREZ, N. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Sanfandila- México: Instituto mexicano de transporte. Publicación técnica N° 142.

GARNICA, P., GÓMEZ, J. y SESMA, J. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Sanfandila- México: Instituto mexicano de transporte. Publicación técnica N° 197.

HERRERA, M. (2014). *Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios Aashto 1993 y 2002*. Tesis. Lima: Universidad de Piura.



HIGUERA H., Y SANDOVAL, C. (2011). "Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica" en *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, vol. 20 y No. 30.

JUANYU LIU, LIN LI; XIONG ZHANG. (2010). *Resilient Modulus Characterization of Alaskan Granular Base Materials*. Fairbanks: Alaska University Transportation Center.

LEIVA, F. *Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas. Desarrollo de curvas maestras. 1ra parte*. Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).

LEIVA, P. (2013). *Guía del Usuario Herramienta de Cálculo de la Curva Maestra de Módulo Dinámico IMoDin 1.1*. Unidad de Materiales y Pavimentos Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica.

OSORIO, R. y VIDAL, J. (2002). "Módulo Resiliente de Suelos Fino granulares" en *REVISTA Universidad EAFIT*, N° 125.

SÁNCHEZ SABOGAL, F. *Diseño de pavimentos asfálticos para calles y carreteras*. Módulo 12.

VIDAL, J. (2006). "Comportamiento dinámico de mezclas asfálticas" en *REVISTA Universidad EAFIT*.