

RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y  
EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO

MARIO HELBERTO LEAL NORIEGA I.C.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AGRICOLA  
POSGRADO EN INGENIERIA – GEOTECNIA  
BOGOTA  
2010

RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE HALLADO POR RETROCALCULO Y  
EL ENCONTRADO EN ENSAYOS DE LABORATORIO

MARIO HELBERTO LEAL NORIEGA I.C.

Tesis de Maestría

Director:

OCTAVIO CORONADO GARCIA I.C., MSc., PhD.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AGRICOLA  
POSGRADO EN INGENIERIA – GEOTECNIA  
BOGOTA  
2010

## AGRADECIMIENTOS

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación he contado con la colaboración de diferentes profesionales, compañeros de universidad, amigos y familiares, a los cuales quiero expresar mis más sinceros agradecimientos después de haber culminado el presente documento:

Al Ing. Octavio Coronado García, director de tesis, quién con su apoyo, recomendaciones y aportes contribuyó a la materialización del presente trabajo.

A los ingenieros Ferney Betancourt y Weimar García, quienes facilitaron el préstamo del equipo de Deflectometría de Impacto, así como las instalaciones del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional, para la ejecución del trabajo experimental requerido en la investigación.

Al Ing. Guillermo Ávila, quién gracias a su colaboración me permitió subsanar una serie de imprevistos acarreados en el presente trabajo.

Al Ing. Miguel Saumet, por dedicar parte de su tiempo para la capacitación requerida y necesaria para el manejo del equipo de deflectometría de impacto de la Universidad Nacional, así como del software de retrocálculo DAPS, con el cual se ejecutó una parte importante de la investigación.

A la Pontificia Universidad Javeriana, así como al Ing. Hermes Vacca, por colaborarme en la gestión requerida para la ejecución de algunos ensayos de laboratorio indispensables dentro de la investigación y por compartir sus conocimientos para el desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Javier Millán, por brindarme la posibilidad de participar en algunos proyectos de carácter profesional en su firma JAM Ingeniería, por permitirme hacer uso de sus instalaciones para realizar parte del trabajo escrito del presente documento, y a todo su equipo de trabajo, quienes me apoyaron anímicamente durante la realización del mismo.

Al Ing. Julián Fernando Chaves, compañero de la maestría y amigo, quién gracias a su colaboración y ayuda hizo posible que yo pudiera cumplir esta meta personal.

A mi esposa Diana C. Moreno M., quién fue mi apoyo incondicional y se convirtió en mi consejera durante todo el trabajo realizado para la finalización de la presente tesis.

A mi bebé Mariana C. Leal Moreno, quién fue mi inspiración durante el desarrollo de la investigación.

A Dios y a mi familia, quienes me apoyaron en todo momento para cumplir con este objetivo trazado con anterioridad.

Por último, a mis docentes, compañeros de universidad, laboratoristas, y todas aquellas personas que me apoyaron y que de una u otra forma contribuyeron para la materialización del presente trabajo de investigación.

## CONTENIDO

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>	<b>13</b>
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.3	HIPÓTESIS	14
1.4	OBJETIVO GENERAL	14
1.5	OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
<b><u>2</u></b>	<b><u>MÓDULO RESILIENTE: REVISIÓN DE LITERATURA EXISTENTE.</u></b>	<b>16</b>
2.1	DEFINICIÓN	16
2.2	NIVELES DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE	17
2.3	EVOLUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE	18
2.4	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN ENSAYOS DE LABORATORIO	18
2.4.1	ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE	18
2.4.1.1	Conformación del equipo triaxial	18
2.4.1.2	Pulso de onda para la carga repetida	19
2.4.1.3	Descripción del procedimiento de ensayo	19
2.4.1.4	Tipos se material	20
2.4.1.5	Tamaño de la muestra	21
2.4.1.6	Secuencia del Ensayo	21
2.4.2	FACTORES QUE INFLUENCIAN EL MÓDULO RESILIENTE DETERMINADO EN LABORATORIO	21
2.4.2.1	Características del módulo resiliente en suelos finos	21
2.4.2.2	Características del módulo resiliente en suelos granulares	23
2.5	MODELOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE	25
2.5.1	MODELO DEL ESFUERZO BULK	26
2.5.2	MODELO DEL ESFUERZO DESVIADOR	26
<b><u>3</u></b>	<b><u>DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO: REVISIÓN DE LITERATURA EXISTENTE.</u></b>	<b>27</b>
3.1	GENERALIDADES	27
3.2	CONCEPTO DE DEFLEXIÓN	27
3.3	MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	28
3.4	DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO	28
3.4.1	GENERALIDADES	28
3.4.2	EL ÁREA DEL CUENCO DE DEFLEXIONES	29
3.4.3	DEFLEXIÓN MÁXIMA	30
3.4.4	FACTORES QUE INCIDEN EN LA MEDICIÓN DE DEFLEXIONES	31
3.4.4.1	Temperatura	31
3.5	FILOSOFÍA DEL RETROCÁLCULO	32
<b><u>4</u></b>	<b><u>RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE DE LABORATORIO Y EL ENCONTRADO POR METODOLOGÍAS DE RETROCÁLCULO.</u></b>	<b>34</b>

<b>5</b>	<b><u>METODOLOGÍA</u></b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>TRABAJO DE CAMPO Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b>	<b>37</b>
5.1.1	DETERMINACIÓN DEL ÁREA ADECUADA DONDE SE LOCALIZARÍA EL TRAMO DE PRUEBA	37
5.1.1.1	Tipo de Estructura y Localización	37
5.1.1.2	Condiciones existentes en el área de investigación durante la etapa de construcción	37
5.1.2	EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN OBRA	39
5.1.3	REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO CON FWD	39
<b>5.2</b>	<b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
5.2.1	ENSAYOS RUTINARIOS DE CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN	40
5.2.2	ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE	41
5.2.2.1	Determinación del contenido de humedad requerido para los materiales ensayados	41
5.2.2.2	Elaboración de las probetas en laboratorio	41
5.2.3	MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	42
<b>5.3</b>	<b>METODOLOGÍA PARA RETROCÁLCULO DE MÓDULOS</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b><u>RESULTADOS EXPERIMENTALES</u></b>	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>DEFLEXIONES OBTENIDAS EN EL TRABAJO DE CAMPO</b>	<b>43</b>
6.1.1	CUENCO DE DEFLEXIONES	43
6.1.2	CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES POR EFECTOS DE CARGA	43
6.1.3	CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES POR EFECTOS DE TEMPERATURA	44
6.1.3.1	Corrección para deflexiones medidas bajo el centro del plato de carga	44
6.1.3.2	Corrección para deflexiones medidas a cierta distancia del centro del plato de carga	44
6.1.4	DEFLEXIONES CORREGIDAS POR EFECTOS DE TEMPERATURA	45
<b>6.2</b>	<b>RESULTADOS DE LABORATORIO</b>	<b>45</b>
6.2.1	BASE GRANULAR	45
6.2.1.1	Ensayos de caracterización física básicos	45
6.2.1.2	Ensayos de módulo resiliente	45
6.2.2	SUBBASE GRANULAR	47
6.2.2.1	Ensayos de caracterización física básicos	47
6.2.2.2	Ensayos de módulo resiliente	47
6.2.3	MATERIAL GRANULAR TIPO B-600	49
6.2.3.1	Ensayos de caracterización física básicos	49
6.2.3.2	Ensayos de módulo resiliente	49
6.2.4	SUBRASANTE GRANULAR	50
6.2.4.1	Ensayos de módulo resiliente	51
6.2.5	CARPETA ASFÁLTICA	52
<b>6.3</b>	<b>MÓDULOS OBTENIDOS POR MEDIO DE RETROCÁLCULO</b>	<b>53</b>
6.3.1	MÓDULOS RETROCALCULADOS EN LA CAPA DE SUBRASANTE	53
6.3.2	MÓDULOS RETROCALCULADOS EN LA CAPA DE MATERIAL GRANULAR	54
6.3.3	MÓDULOS RETROCALCULADOS EN LA CARPETA ASFÁLTICA	56
<b>7</b>	<b><u>ANÁLISIS DE RESULTADOS</u></b>	<b>58</b>
<b>7.1</b>	<b>DETERMINACIÓN DEL VALOR DE MÓDULO RESILIENTE DE SITIO</b>	<b>58</b>

7.1.1	MATERIAL DE SUBRASANTE.....	58
7.1.2	MATERIAL GRANULAR.....	59
7.1.3	CARPETA ASFÁLTICA.....	59
<b>7.2</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDOS EN LABORATORIO ....</b>	<b>61</b>
7.2.1	EFFECTO DE LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y ESTADO DE ESFUERZOS .....	61
7.2.2	EFFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA.....	63
7.2.3	EFFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS Y EL INDICE DE PLASTICIDAD .....	66
<b>7.3</b>	<b>CONSIDERACION PARA LA ESTIMACIÓN DE UN FACTOR DE AJUSTE QUE PERMITA COMPARAR LOS MÓDULOS RESILIENTES OBTENIDOS EN LABORATORIO CON LOS ENCONTRADOS DE LA APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS DE RETROCÁLCULO.....</b>	<b>67</b>
<b>7.4</b>	<b>COMPARACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS HALLADOS POR RETROCÁLCULO Y LOS OBTENIDOS A PARTIR DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....</b>	<b>68</b>
7.4.1	CAPA DE SUBRASANTE .....	68
7.4.1.1	Material granular de mejoramiento tipo b-600.....	68
7.4.1.2	Subrasante granular remanente.....	70
7.4.2	CAPA GRANULAR.....	72
7.4.2.1	Material de Base Granular.....	72
7.4.2.2	Material de Subbase Granular.....	74
7.4.3	CARPETA ASFÁLTICA.....	76
<b>8</b>	<b><u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u></b>	<b>78</b>
<b>9</b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b>81</b>

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN PAVIMENTO CON BASE EN RESULTADOS DEL ÁREA DEL CUENCO DE DEFLEXIÓN Y LA DEFLEXIÓN MÁXIMA .....	30
TABLA 2 RELACIÓN DE HORARIOS EN EL CUAL SE EJECUTARON LOS ENSAYOS DE DEFLECTOMETRÍA.....	40
TABLA 3 RESUMEN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN BÁSICA REALIZADOS EN EL LABORATORIO DE SUELOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ. ....	40
TABLA 4 RESUMEN DE HUMEDADES Y DENSIDADES ADOPTADAS PARA LOS ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE.....	41
TABLA 5 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA TOMADA POR EL FWD DURANTE LAS PRUEBAS DE DEFLECTOMETRÍA.....	43
TABLA 6 COEFICIENTES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA $C_T$ , OBTENIDOS PARA CADA JORNADA DE PRUEBAS.....	44
TABLA 7 COEFICIENTES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA DIFERENTES SEPARACIONES DE GEÓFONOS, PARA UN ESPESOR DE CAPA ASFÁLTICA DE 24 CM. ....	45
TABLA 8 HUMEDADES Y DENSIDADES DE LAS PROBETAS ELABORADAS EN LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MR SOBRE EL MATERIAL DE BASE GRANULAR. ....	46
TABLA 9 VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS PARA LA BASE GRANULAR DESPUÉS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE. ....	46
TABLA 10 PARÁMETROS QUE DESCRIBEN LOS VALORES DE MR EN FUNCIÓN DE $\theta$ – BASE GRANULAR .....	47
TABLA 11 HUMEDADES Y DENSIDADES DE LAS PROBETAS ELABORADAS EN LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MR SOBRE EL MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR. ....	47
TABLA 12 VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS PARA LA SUBBASE GRANULAR DESPUÉS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE. ....	48
TABLA 13 PARÁMETROS QUE DESCRIBEN LOS VALORES DE MR EN FUNCIÓN DE $\theta$ – SUBBASE GRANULAR. ....	48
TABLA 14 DENSIDADES Y HUMEDADES REALES DE LAS PROBETAS ELABORADAS EN LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MR SOBRE EL MATERIAL GRANULAR B-600. ....	49
TABLA 15 VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS PARA EL GRANULAR B-600 DESPUÉS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE. ....	49
TABLA 16 PARÁMETROS QUE DESCRIBEN LOS VALORES DE MR EN FUNCIÓN DE $\theta$ - SUBRASANTE B600. ....	50
TABLA 17 RESUMEN RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE MATERIAL REMANENTE DE SUBRASANTE.....	50
TABLA 18 DENSIDADES Y HUMEDADES REALES DE LAS PROBETAS ENSAYADAS EN LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MR SOBRE EL MATERIAL DE SUBRASANTE GRANULAR. ....	51
TABLA 19 VALORES DE MÓDULO OBTENIDOS PARA LA SUBRASANTE REMANENTE DESPUÉS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE. .	51
TABLA 20 PARÁMETROS QUE DESCRIBEN LOS VALORES DE MR EN FUNCIÓN DE $\theta$ – SUBRASANTE GRANULAR REMANENTE. ....	52
TABLA 21 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO. ....	52
TABLA 22 MÓDULOS RETROCALCULADOS DE SUBRASANTE – PRUEBA 1.....	53
TABLA 23 MÓDULOS RETROCALCULADOS DE SUBRASANTE – PRUEBA 2. ....	54
TABLA 24 MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CAPA GRANULAR – PRUEBA 1. ....	55
TABLA 25 MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CAPA GRANULAR – PRUEBA 2.....	55
TABLA 26 MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA – PRUEBA 1 .....	56
TABLA 27 MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA – PRUEBA 2. ....	57
TABLA 28 ESTADO DE ESFUERZOS CALCULADO PARA LA CAPA GRANULAR Y DE SUBRASANTE EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO. .	58
TABLA 29 VALORES DE MR CALCULADOS PARA LA SUBRASANTE GRANULAR Y EL MATERIAL B-600. ....	59
TABLA 30 VALORES DE MR CALCULADOS PARA LOS MATERIALES DE BASE Y SUBBASE GRANULAR.....	59
TABLA 31 VALORES DE MÓDULO DINÁMICO OBTENIDOS PARA UNA TEMPERATURA DE 20°C Y UNA FRECUENCIA DE 10 Hz. ....	60
TABLA 32 FACTORES DE AJUSTE (k) ENCONTRADOS PARA EL MATERIAL DE SUBRASANTE GRANULAR TIPO B-600. ....	69
TABLA 33 FACTORES DE AJUSTE (k) ENCONTRADOS PARA EL MATERIAL DE SUBRASANTE GRANULAR REMANENTE.....	71
TABLA 34 FACTORES DE AJUSTE (k) ENCONTRADOS PARA EL MATERIAL DE BASE GRANULAR.....	73
TABLA 35 FACTORES DE AJUSTE (k) ENCONTRADOS PARA EL MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR.....	75
TABLA 36 FACTORES DE AJUSTE (k) ENCONTRADOS PARA LA CARPETA ASFÁLTICA.....	77

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 DEFORMACIÓN EN MATERIALES GRANULARES DURANTE UN CICLO DE CARGA Y DESCARGA. ....	16
FIGURA 2 ACUMULACIÓN DE DEFORMACIÓN PERMANENTE DURANTE UN PROCESO DE CARGA Y DESCARGA. ....	16
FIGURA 3 FORMA Y DURACIÓN DEL PULSO DE CARGA EMPLEADO PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRUEBA DE MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO. ....	19
FIGURA 4 VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN FUNCIÓN DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA SUELOS FINOS. ....	22
FIGURA 5 EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS FINOS. ....	22
FIGURA 6 RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE Y EL ESTADO FÍSICO DEL SUELO. ....	23
FIGURA 7 INFLUENCIA DEL ESTADO DE ESFUERZOS EN EL VALOR DEL MÓDULO RESILIENTE. ....	24
FIGURA 8 VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD DE COMPACTACIÓN. ....	24
FIGURA 9 DISMINUCIÓN DEL MÓDULO CON EL INCREMENTO DEL CONTENIDO DE FINOS. ....	25
FIGURA 10 CUENCO DE DEFLEXIONES BAJO LA APLICACIÓN DEL PLATO DE CARGA. ....	28
FIGURA 11 COMPONENTES BÁSICOS DE MEDICIÓN DEL FWD – JILS 20 PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE BOGOTÁ. ....	29
FIGURA 12 REPRESENTACIÓN DE DOS CUENCOS DE DEFLEXIÓN DIFERENTES CON UN MISMO VALOR DE DEFLEXIÓN MÁXIMA (D <sub>0</sub> ). ....	30
FIGURA 13 DATOS REQUERIDOS PARA EL CÁLCULO DIRECTO Y EL CÁLCULO INVERSO. ....	32
FIGURA 14 COMPARACIÓN DEL CUENCO DE DEFLEXIÓN MEDIDO Y TEÓRICO. ....	33
FIGURA 15 LOCALIZACIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA EN EL PERÍMETRO URBANO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ. ....	37
FIGURA 16 CONFIGURACIONES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO CONSTRUIDA A LO LARGO DEL TRAMO DE PRUEBA. ....	38
FIGURA 17 ZONIFICACIÓN DEL ÁREA DONDE SE LOCALIZA EL TRAMO DE PRUEBA. ....	38
FIGURA 18 DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE TOMA DE DEFLEXIONES A LO LARGO DEL TRAMO DE PRUEBA. ....	39
FIGURA 19 VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA EL MATERIAL DE BASE GRANULAR EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA. ....	46
FIGURA 20 VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA EL MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA. ....	48
FIGURA 21 VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA EL MATERIAL GRANULAR B-600 EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA. ....	50
FIGURA 22 VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE PARA LA SUBRASANTE REMANENTE EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA. ....	52
FIGURA 23 VARIACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. ....	53
FIGURA 24 CURVAS DE MÓDULOS RETROCALCULADOS DE SUBRASANTE – PRUEBA 1. ....	54
FIGURA 25 CURVAS DE MÓDULOS RETROCALCULADOS DE SUBRASANTE – PRUEBA 2. ....	54
FIGURA 26 CURVAS DE MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CAPA GRANULAR – PRUEBA 1. ....	55
FIGURA 27 CURVAS DE MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CAPA GRANULAR – PRUEBA 2. ....	55
FIGURA 28 CURVAS DE MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA – PRUEBA 1. ....	56
FIGURA 29 CURVAS DE MÓDULOS RETROCALCULADOS DE LA CARPETA ASFÁLTICA – PRUEBA 2. ....	57
FIGURA 30 VALORES DE MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO ADOPTADOS PARA LA ESTRUCTURA DEL COSTADO NORTE. ....	60
FIGURA 31 VALORES DE MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO ADOPTADOS PARA LA ESTRUCTURA DEL COSTADO SUR. ....	60
FIGURA 32 TRAYECTORIAS DE ESFUERZOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES RESILIENTES DE LOS MATERIALES GRANULARES. ....	61
FIGURA 33 VARIACIÓN DEL MR CON EL INCREMENTO DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UN MATERIAL DE BASE GRANULAR COMPACTADO A WO <sub>PT</sub> . ....	62
FIGURA 34 VARIACIÓN DEL MR CON EL INCREMENTO DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UN MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR COMPACTADO A WO <sub>PT</sub> - 2,5%. ....	62
FIGURA 35 VARIACIÓN DEL MR CON EL INCREMENTO DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA UN MATERIAL GRANULAR TIPO B-600 COMPACTADO A WO <sub>PT</sub> + 2,5%. ....	63
FIGURA 36 VARIACIÓN DEL MR PARA UN MATERIAL GRANULAR TIPO B-600 PARA DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD. ....	64
FIGURA 37 VARIACIÓN DE MR(0) EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN MATERIAL GRANULAR TIPO B-600. ....	64
FIGURA 38 COMPARACIÓN DEL MR PARA LOS DIFERENTES MATERIALES EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN COMPACTADOS A UNA WO <sub>PT</sub> . ....	65
FIGURA 39 VARIACIÓN DE MR(0) SEGÚN EL CONTENIDO DE HUMEDAD PARA DIFERENTES MATERIALES GRANULARES. ....	66

FIGURA 40 INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE FINOS EN EL VALOR DEL MR(0). .....	67
FIGURA 41 RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDOS POR RETROCÁLCULO Y LABORATORIO PARA EL MATERIAL GRANULAR TIPO B-600. ....	69
FIGURA 42 RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD Y EL FACTOR DE AJUSTE K – SUBBRASANTE GRANULAR TIPO B600. ....	70
FIGURA 43 RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDOS POR RETROCÁLCULO Y LABORATORIO PARA EL MATERIAL DE SUBBRASANTE GRANULAR REMANENTE. ....	71
FIGURA 44 RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD Y EL FACTOR DE AJUSTE K – SUBBRASANTE GRANULAR REMANENTE. ....	72
FIGURA 45 RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDOS POR RETROCÁLCULO Y LABORATORIO PARA UN MATERIAL DE BASE GRANULAR. ....	73
FIGURA 46 RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD Y EL FACTOR DE AJUSTE K – BASE GRANULAR.....	74
FIGURA 47 RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDOS POR RETROCÁLCULO Y LABORATORIO PARA UN MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR. ....	75
FIGURA 48 RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD Y EL FACTOR DE AJUSTE K – SUBBASE GRANULAR. ....	76
FIGURA 49 RESULTADOS DE MÓDULO DINÁMICO OBTENIDOS POR RETROCÁLCULO Y LABORATORIO PARA LA CARPETA ASFÁLTICA. ....	76
FIGURA 50 RELACIÓN ENTRE EL FACTOR DE AJUSTE (K) Y LA TEMPERATURA DE LA CARPETA ASFÁLTICA. ....	77

## LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1. SECUENCIAS DE CARGA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE
- ANEXO 2. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL FWD
- ANEXO 3. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO DE PRUEBA
- ANEXO 4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO PARA ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE SOBRE BASE GRANULAR
- ANEXO 5. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO
- ANEXO 6. NÚCLEOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EMPLEADOS PARA EL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO Y RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA BÁSICA
- ANEXO 7. METODOLOGÍAS DE RETROCÁLCULO EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN
- ANEXO 8. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES DE CAMPO
- ANEXO 9. CUENCOS DE DEFLEXIÓN
- ANEXO 10. FACTORES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA DEFLEXIONES ALEJADAS DEL CENTRO DE APLICACIÓN DE LA CARGA, EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE LA CARPETA ASFÁLTICA
- ANEXO 11. DEFLEXIONES CORREGIDAS POR CARGA Y TEMPERATURA
- ANEXO 12. RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL DE BASE GRANULAR
- ANEXO 13. RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR
- ANEXO 14. RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL GRANULAR TIPO B-600
- ANEXO 15. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA SUBRASANTE REMANENTE
- ANEXO 16. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA LA CAPA GRANULAR Y DE SUBRASANTE

## LISTADO DE SIMBOLOS

<b>MR</b>	Módulo Resiliente
<b><math>\sigma_d</math></b>	Esfuerzo desviador repetido o dinámico ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ).
<b><math>\epsilon_r</math></b>	Deformación axial recuperable de la muestra ensayada
<b><math>\sigma_3</math></b>	Esfuerzo principal mayor
<b><math>\sigma_1</math></b>	Esfuerzo principal menor
<b>CBR</b>	Relación de soporte de California
<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>SHRP</b>	Strategic Highway Research Program
<b><math>\theta</math></b>	Esfuerzo bulk
<b><math>K_1, K_2, K_3</math> y <math>K_4</math></b>	Coefficientes propios del material obtenidos por regresión.
<b>FWD</b>	Falling Weight Deflectometer
<b>d0</b>	Deflexión máxima, en el centro de aplicación de la carga (mm).
<b>d30</b>	Deflexión a 30 cm del centro de aplicación de la carga (mm).
<b>d60</b>	Deflexión a 60 cm del centro de aplicación de la carga (mm).
<b>d90</b>	Deflexión a 90 cm del centro de aplicación de la carga (mm).
<b>ACD</b>	Área del Cuenco de Deflexión.
<b>w</b>	Contenido de humedad
<b><math>\gamma_d</math></b>	Peso unitario seco
<b>TRB</b>	Transportation Research Board
<b>K0</b>	Coefficiente de presión en reposo
<b><math>\sigma_h</math></b>	Esfuerzo horizontal total
<b><math>\sigma_v</math></b>	Esfuerzo vertical total
<b><math>\Delta\sigma_v</math></b>	Incremento de esfuerzo vertical
<b><math>M_p</math></b>	Temperatura media de la mezcla (°F).
<b><math>M_a</math></b>	Temperatura media ponderada del aire (°F).
<b>Z</b>	Profundidad a la cual se estima la temperatura de la mezcla (in), se toma en el punto medio de la capa.
<b><math>C_t</math></b>	Coefficiente de corrección por temperatura.
<b><math>h_1</math></b>	Espesor de la carpeta asfáltica (cm).
<b>t</b>	Temperatura de la carpeta asfáltica al momento del ensayo (°C).
<b>MD</b>	Mezcla densa
<b>HAC</b>	Espesor de las capas asfálticas
<b><math>P_a</math></b>	Presión atmosférica
<b><math>W_{opt}</math></b>	Humedad óptima (%)
<b>MR(0)</b>	Modulo inicial
<b>MRL</b>	Módulo resiliente de laboratorio
<b>MRR</b>	Módulo resiliente retrocalculado
<b>K</b>	Factor de ajuste

### LISTADO DE UNIDADES

<b>psi</b>	lb/pulg <sup>2</sup>
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>mm</b>	milímetros
<b>lb</b>	unidad de peso
<b>in</b>	pulgadas
<b>ksi</b>	kilolibras por pulgada cuadrada
<b>°F</b>	grados fahrenheit
<b>°C</b>	grados centígrados
<b>mils</b>	milésimas de pulgada
<b>μm</b>	milésimas de milímetro
<b>seg</b>	segundo
<b>Hz</b>	Hertz, unidad de frecuencia
<b>cm</b>	centímetro

## 1 INTRODUCCIÓN

El módulo resiliente es un parámetro que representa el comportamiento de los materiales que conforman la estructura de un pavimento ante la acción de las cargas del tránsito a que se ven sometidos. Su relación está determinada entre el esfuerzo dinámico actuante en una cámara triaxial y la deformación axial recuperable del material.

Debido a que la realización del ensayo de módulo resiliente en laboratorio implica tiempo y costos considerables, se ha optado por obtener este parámetro a partir de información recopilada mediante pruebas no destructivas, como las desarrolladas por equipos de deflectometría de impacto ó FWD (Falling Weight Deflectometer) por sus siglas en inglés.

El deflectómetro 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 deflexión superficiales de la estructura por efecto del impacto a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga.

Con base en las deflexiones medidas es posible por medio de metodologías de retrocálculo determinar el módulo resiliente de cada capa de la estructura de pavimento, minimizando de esta forma tiempo y costos, y reduciendo los procedimientos destructivos que impliquen la rotura de la vía y la extracción de muestras de campo.

Estas metodologías de retrocálculo han permitido observar que los módulos obtenidos son generalmente de mayor magnitud que los determinados por medio de ensayos de laboratorio, encontrando factores de ajuste que relacionen unos y otros.

Esta investigación busca mostrar algunas metodologías de retrocálculo que permitirán comparar los resultados obtenidos por cada una de ellas, con los módulos determinados a partir de ensayos de laboratorio; analizando la relación entre los factores de ajuste hallados con el contenido de humedad de los materiales granulares, así como con la temperatura del pavimento sobre las mezclas asfálticas.

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los pavimentos son estructuras diseñadas para ofrecer seguridad, confort y economía para los vehículos que transitan sobre él. Con el paso del tiempo el efecto repetitivo de las cargas del tránsito, la acción climática, las deficiencias constructivas o de los materiales utilizados, inducen un deterioro sobre su estructura. En función de su grado de deterioro se diseñan las reparaciones o rehabilitaciones pertinentes para prolongar su vida útil.

Los métodos recientes para el diseño de pavimentos emplean el parámetro de módulo resiliente para la caracterización mecánica de los materiales que conforman su estructura, debido a que representa el comportamiento de los suelos ante la acción dinámica del tránsito, recreando de forma más real el estado de esfuerzos y de deformaciones al que se ve sometido.

El módulo resiliente generalmente es hallado por correlaciones con otros ensayos de laboratorio, como el ensayo de la relación de soporte de California (CBR). Aquí radica su principal deficiencia,

ya que ensayos como el mencionado no representa el comportamiento real de los materiales cuando son sometidos a la acción de cargas repetidas.

Esta investigación busca determinar el coeficiente de ajuste que relaciona los módulos resilientes mediante el empleo de metodologías de retrocálculo y laboratorio, analizados bajo la influencia de una condición propia del material como lo es el contenido de humedad o la temperatura.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La importancia en la determinación de parámetros que mejor representen las condiciones esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura de un pavimento ha sido de interés relevante dentro de la ingeniería vial.

Como resultado de estas investigaciones se han desarrollado técnicas y nuevos equipos que se han difundido rápidamente a nivel internacional, siendo uno de los más utilizados el equipo de deflectometría de impacto ó FWD por sus siglas en inglés.

El deflectómetro de impacto permite realizar por medio de técnicas no destructivas la evaluación estructural de pavimentos, una práctica que se ha difundido con gran celeridad debido a la velocidad y versatilidad con la que se recopila la información, así como a los menores costos asociados; comparados con los procedimientos tradicionales que incluyen perforaciones, apiques y extracción de muestras.

Con la información obtenida de estos equipos es posible determinar el valor de los módulos de las capas que conforman un pavimento empleando métodos de retrocálculo. Los resultados encontrados por estas metodologías y los obtenidos a partir de muestras ensayadas en laboratorio, nos permitirá determinar los coeficientes de ajuste que relacionan entre sí este parámetro.

Las investigaciones realizadas se han concentrado en determinar un factor de correlación para los materiales de subrasante, los cuales son usados para la determinación de módulos en técnicas de rehabilitación para pavimentos, sin ahondar en la determinación de este factor para materiales de capa granular y mezclas asfálticas, aporte de esta investigación.

## **1.3 HIPÓTESIS**

Los coeficientes que relacionan el módulo de laboratorio y retrocalculado en materiales granulares aumentan a medida que se disminuye la humedad, y tienen un valor cercano a 1,0 en mezclas asfálticas.

## **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Determinar los factores de ajuste que relacionan el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el obtenido a partir de ensayos de laboratorio, frente a la variación de parámetros como la humedad y la temperatura.

## **1.5 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Analizar el comportamiento resiliente de materiales granulares y asfálticos con base en ensayos realizados en laboratorio.

Emplear el deflectómetro de impacto de la Universidad Nacional para la realización de pruebas de deflectometría sobre una estructura de pavimento flexible.

Determinar mediante metodologías de retrocálculo los módulos resilientes de las capas de un pavimento asfáltico.

Realizar análisis de la influencia de la humedad y la temperatura en los valores de módulo obtenidos en laboratorio, así como en los factores de ajuste.

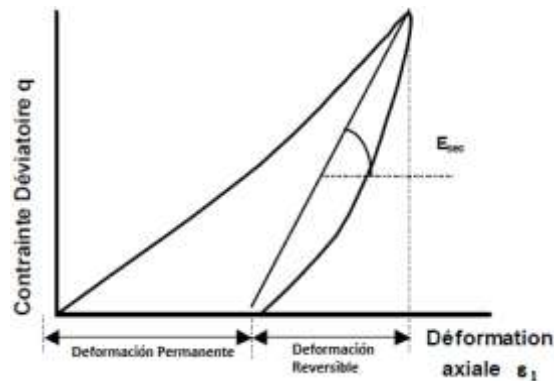
## 2 MÓDULO RESILIENTE: REVISIÓN DE LITERATURA EXISTENTE.

### 2.1 DEFINICIÓN

El paso continuo de los vehículos sobre un pavimento somete a esta estructura a un gran número de ciclos de carga y descarga que induce a los diferentes materiales que la componen a un de estado de esfuerzos y deformaciones variables, en función de la magnitud de la carga que actúa sobre ella y del tiempo de duración de la misma.

Durante un ciclo los materiales no se recuperan en su totalidad de la deformación a la que han sido sometidos, por lo que la deformación original total estará ahora dividida en dos partes: una deformación plástica o permanente y una deformación elástica o resiliente (ver figura 1).

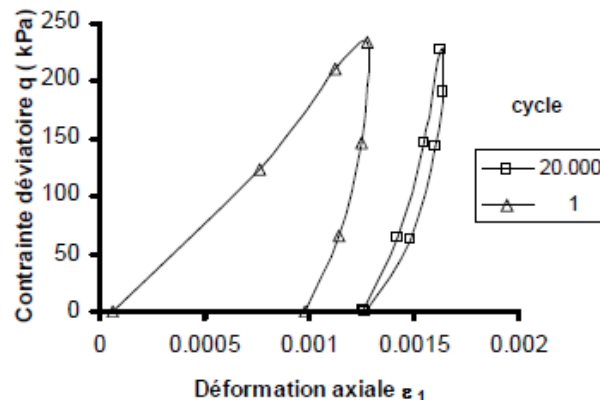
Figura 1 Deformación en materiales granulares durante un ciclo de carga y descarga.



FUENTE: Fleureau, Coronado y Gomes, 2004.

Con el incremento de los ciclos la deformación permanente se va acumulando, aunque dicha deformación en cada ciclo consecutivo va siendo menor, hasta llegar al ciclo N donde prácticamente se recupera toda la deformación inducida (ver figura 2).

Figura 2 Acumulación de deformación permanente durante un proceso de carga y descarga.



FUENTE: Fleureau, Coronado y Gomes, 2004.

Al final de este proceso el material describe prácticamente la misma curva y la deformación permanente tiende a ser muy pequeña, considerando para fines de análisis que el comportamiento del material es fundamentalmente elástico, por lo que se puede caracterizar con el denominado módulo resiliente.

Matemáticamente el módulo resiliente está definido como la relación existente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación axial recuperable después de haber realizado una prueba de carga repetida en una cámara triaxial dinámica, así:

$$MR = \frac{\sigma d}{\epsilon r}$$

## 2.2 NIVELES DE CONFIABILIDAD EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

Las guías de diseño de pavimento flexible determinan un nivel de confiabilidad en el diseño, en función del grado de precisión empleado para la determinación del módulo resiliente como parámetro de entrada; el cual está clasificado en 3 niveles.

### Nivel 1

Otorga la mayor confiabilidad en el diseño, disminuyendo el grado de incertidumbre en la determinación del módulo resiliente. Este parámetro puede ser obtenido mediante 2 formas:

1. Que el módulo resiliente sea determinado en un laboratorio competente, con capacidad de realizar las pruebas triaxiales dinámicas de forma rigurosa según lo indicado en los manuales o procedimientos de prueba normalizados y establecidos para este fin.
2. Que el módulo resiliente sea obtenido por medio de la realización de una prueba de campo no destructiva con un equipo de deflectometría de impacto ó FWD.

### Nivel 2

Proporciona un nivel intermedio de confiabilidad en el diseño y su uso está asociado a la falta de disponibilidad de equipos relacionados dentro del nivel 1. Aquí, el módulo resiliente se obtiene de correlaciones típicas asociadas con otras propiedades del material entre las que se encuentran el peso unitario seco, los límites de Atterberg, la gravedad específica, resultados del ensayo de CBR, la prueba de cono dinámico o de compresión inconfiada, entre otros.

### Nivel 3

Los valores adoptados para el módulo resiliente en el nivel 3 ofrecen la más baja precisión y por consiguiente el nivel de confiabilidad más bajo en el diseño, asumiendo valores típicos representativos encontrados en la literatura según el contenido de humedad óptimo del material analizado.

## **2.3 EVOLUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE**

En 1982, la guía de diseño AASHTO implementó dentro de sus investigaciones un procedimiento de prueba de laboratorio para la determinación del módulo resiliente dirigido principalmente al estudio de los suelos de subrasante denominado: AASHTO T 274-82 "Resilient modulus of subgrade soils".

A finales del año 1989, el Comité de Materiales de la AASHTO decidió retirar de sus ensayos estándar de laboratorio la prueba AASHTO T 274-82, por considerar que debía ser revisada con el fin de mejorarla y optimizar su procedimiento de ensayo.

En 1991, AASHTO aprobó un método mejorado de carácter intermedio para la realización de la prueba de módulo resiliente, la cual incluía no solo los suelos de subrasante sino también los materiales granulares sin tratamiento para las capas de base y subbase, el cual denominó: AASHTO T 292-91 "Resilient modulus testing of subgrade soils and untreated base/subbase materials".

Tres años después, AASHTO propuso como método estándar para determinar en laboratorio el módulo resiliente de los materiales granulares y de subrasante, la prueba denominada: AASHTO T 294-94 "Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils", el cual fue un método originalmente desarrollado por la agencia SHRP también conocido como Protocolo P 46, basado en la prueba AASHTO T 274-82, incorporando en ésta una serie de modificaciones y mejoras para su procedimiento.

En la actualidad el método de prueba para ensayos triaxiales de carga repetida que se encuentra normalizado para la determinación del módulo resiliente en laboratorio está descrito por el procedimiento AASHTO T 307-99 "Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials".

## **2.4 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN ENSAYOS DE LABORATORIO**

### **2.4.1 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE**

En este ensayo las condiciones del tráfico son simuladas mediante la aplicación de una serie de cargas cíclicas sobre una muestra cilíndrica, sometida a diversos esfuerzos de confinamiento.

#### **2.4.1.1 Conformación del equipo triaxial**

El equipo triaxial está conformado de forma resumida por:

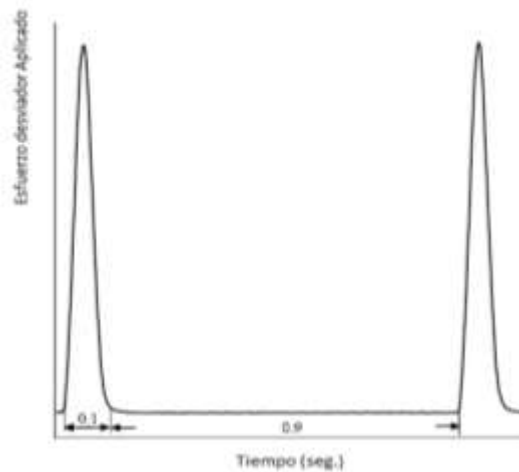
1. Un marco de carga sobre el que está acoplado un pistón encargado de su aplicación.
2. Una celda de carga conectada al pistón, requerida para medir la carga aplicada a la muestra.
3. Una cámara triaxial donde es instalada la muestra del material a ensayar, la cual permite la aplicación de la presión de confinamiento.
4. Un juego de transductores lineales variables diferenciales (LVDT), encargados de medir la deformación generada en la muestra, debido a la aplicación de la carga repetida.
5. Un sistema de adquisición de datos encargado de registrar toda la información durante la ejecución de la prueba.

### 2.4.1.2 Pulso de onda para la carga repetida

La norma AASHTO T 307 requiere que el pulso empleado para la aplicación de la carga posea una duración total de un segundo, discriminado en 0.1 segundo en aplicación de carga y 0.9 segundos en un período de descanso antes de la repetición del nuevo ciclo (ver figura 3).

Este tipo de pulso fue escogido porque representaba de mejor forma la carga inducida por un camión en movimiento sobre la superficie de un pavimento y por similitud al pulso de carga aplicado por los actuales equipos empleados para la realización de pruebas no destructivas como el FWD.

**Figura 3 Forma y duración del pulso de carga empleado para la realización de la prueba de módulo resiliente en laboratorio.**



**FUENTE:** Titi, Elias, Helwany, 2006.

Aunque esta prueba se realiza para condiciones drenadas sobre materiales granulares y suelos finos, la aplicación repetida de su carga de forma considerablemente rápida (debido a su ciclo de carga y descarga) puede conducir a una condición no drenada, particularmente para aquellos materiales finos que posean una baja permeabilidad.

### 2.4.1.3 Descripción del procedimiento de ensayo

La ejecución del ensayo está dividida en dos etapas:

#### **Etapas 1.**

Etapas de acondicionamiento de la probeta que consiste en la aplicación mínima de 500 a 1000 ciclos de carga a un esfuerzo desviador y de confinamiento determinado, con los siguientes propósitos:

1. Estabilizar las deformaciones permanentes que se puedan presentar bajo el estado de esfuerzos inducido y por consiguiente permitir un comportamiento de tipo constante al valor del módulo resiliente.

2. Establecer al final del acondicionamiento una homogeneidad en el contacto entre la probeta con el pedestal y el plato superior de carga, de tal forma que se reduzcan los efectos de una deficiente aplicación y transmisión de carga.

3. Eliminar cualquier perturbación que se pudiera presentar en la muestra por efectos de su preparación en laboratorio.

Al final de los primeros 500 ciclos de carga se deberá corroborar si la probeta aún continua decreciendo en altura, de ser así, la etapa de acondicionamiento deberá extenderse hasta los 1000 ciclos de carga antes de la realización de la segunda etapa, teniendo el cuidado que la deformación total permanente de la probeta no sobrepase como máximo el 5% de su longitud original antes del ensayo.

## **Etapa 2.**

Consta de la aplicación de 100 ciclos de carga de forma independiente durante quince estados de esfuerzo diferentes. Al final de la aplicación de cada estado de esfuerzos se deberán registrar los valores del esfuerzo desviador y de la deformación recuperable para los últimos 5 ciclos de cada secuencia.

Con los datos recopilados se hallará el valor del módulo resiliente promedio para cada estado de esfuerzos. Al finalizar el ensayo obtendremos un conjunto de valores promedio de módulo resiliente, esfuerzo desviador y esfuerzo de confinamiento, que nos permitirá determinar el comportamiento resiliente del material a partir de un ajuste por medio de modelos de tipo matemático.

Los niveles de esfuerzo aplicados para cada etapa están en función del tipo de material que se está ensayando.

### **2.4.1.4 Tipos de material**

Los materiales para el ensayo de módulo resiliente se clasifican en dos tipos:

#### **Materiales tipo 1**

Estos materiales también denominados gruesos, incluyen todos aquellos materiales no tratados que cumplen con el siguiente criterio: menos del 70% de material debe pasar el tamiz No 10 y un máximo del 20% puede pasar el tamiz No 200.

Estos materiales generalmente son empleados para conformar las capas granulares de las estructuras de pavimento y presentan una clasificación AASTHO iguales a A-1, A-1-b, A-2, ó A-3.

#### **Materiales Tipo 2**

Incluye todos aquellos materiales no tratados que no cumplen con el requisito para ser clasificados como materiales tipo 1.

En esta clasificación se encuentran aquellos materiales limo arcillosos encontrados como suelos de subrasante con una clasificación AASHTO iguales a A-4, A-5, A-6 y A-7.

#### **2.4.1.5 Tamaño de la muestra**

La guía AASHTO T 307 recomienda que las dimensiones de la muestra empleada para la realización de la prueba triaxial este en función del tamaño máximo de las partículas del material, así:

1. Para materiales tipo 1 la probeta deberá tener un diámetro mayor a cinco veces el tamaño máximo de la partícula del material, recomendando el empleo de muestras de 6 pulgadas de diámetro (150 mm) y 12 pulgadas de altura (300 mm) para materiales con características de base o subbase con un tamaño de partícula superior a 0.75 pulgadas (19 mm).
2. Para materiales finos catalogados como tipo 2, se recomienda utilizar muestras de 2.8 pulgadas de diámetro (71 mm) ya sean extraídas de forma inalterada o reconstituida en laboratorio. Si el tamaño máximo de partícula en estas muestras excede el 25% del diámetro de molde, se deberá utilizar un molde más grande.

La norma recomienda que las muestras sean conformadas por medio de compactación estática o vibratoria empleando para ello de tres a seis capas según las dimensiones de la probeta.

#### **2.4.1.6 Secuencia del Ensayo**

Para cada tipo de material se desarrolla una secuencia de ensayo diferente, la cual varía fundamentalmente en los niveles de esfuerzo que le son inducidos a la probeta (ver anexo 1).

### **2.4.2 FACTORES QUE INFLUENCIAN EL MÓDULO RESILIENTE DETERMINADO EN LABORATORIO**

#### **2.4.2.1 Características del módulo resiliente en suelos finos**

El módulo resiliente no es una propiedad constante de los suelos finos ya que su magnitud es dependiente de diversos factores, tal como lo estudiaron Li y Selig (1994), así como Lee y otros (1997).

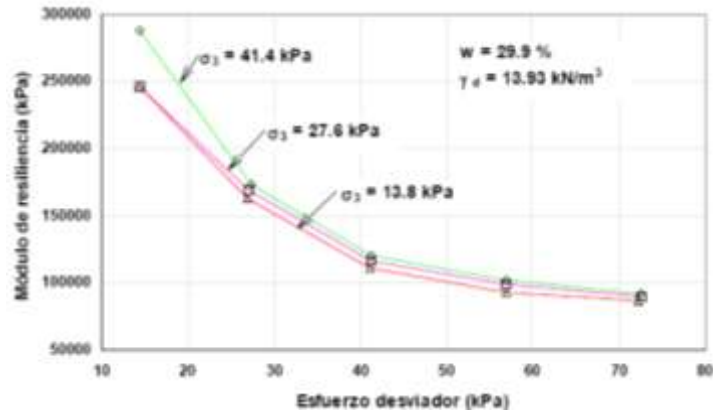
Los factores de mayor influencia en el valor del módulo son: la condición de carga o el estado de esfuerzos, el tipo de suelo y su estructura, el estado físico del suelo, el grado de saturación y la tixotropía. A continuación se tratarán algunos de ellos.

#### **1. Condición de Carga o Estado de Esfuerzos**

El estado de esfuerzos en los suelos finos está afectado por la acción conjunta de algunos factores como la aplicación del esfuerzo desviador, la presión de confinamiento y el número de ciclos de carga.

En los suelos finos empleados como subrasante donde el confinamiento es mucho menos significativo que el esfuerzo desviador, el módulo resiliente presenta una disminución en su magnitud cuando se aplica un incremento en el esfuerzo desviador, principalmente para materiales de tipo arcilloso (ver figura 4).

**Figura 4 Variación del módulo resiliente en función del estado de esfuerzos para suelos finos.**



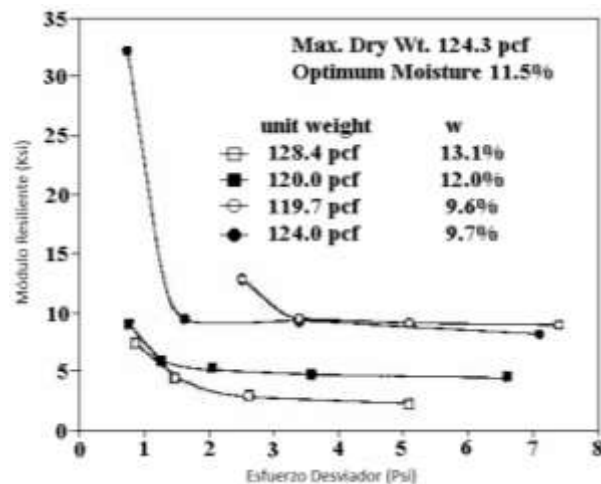
FUENTE: Instituto Mexicano del Transporte, 2001

## 2. Tipo de Suelo y Estructura

Algunos estudios realizados han demostrado que la estructura de los suelos se ve afectada por factores como el método de compactación, el esfuerzo de compactación y el contenido de agua, los cuales influyen directamente en la magnitud del módulo resiliente para muestras compactados en laboratorio.

Para muestras compactadas del lado seco de la humedad óptima, las magnitudes del módulo fueron superiores, comparadas con las muestras compactadas del lado húmedo, conservando la tendencia de menores valores a medida que se incrementa el esfuerzo desviador (ver figura 5).

**Figura 5 Efecto del contenido de humedad en el módulo resiliente de suelos finos.**



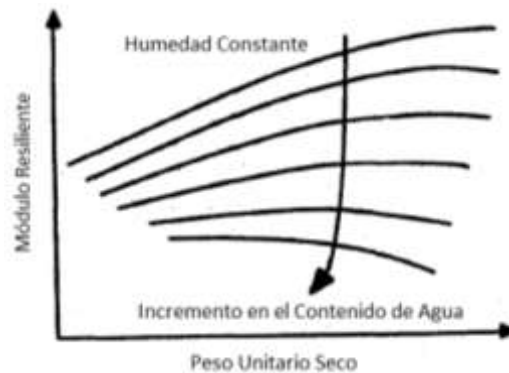
FUENTE: Kim y Siddiki, 2006.

### 3. Estado Físico del Suelo

El estado físico del suelo generalmente está representado por su contenido de humedad y su peso unitario seco, fundamentado en que estos dos factores permiten obtener las condiciones óptimas de la curva de compactación para un suelo dado.

Li y Selg (1994), basados en una recopilación de resultados de módulo resiliente encontrados en la literatura, mostraron que éste decrece en magnitud para un mismo peso unitario seco, cuando se presenta un aumento en el contenido de humedad del suelo (ver figura 6).

Figura 6 Relación entre el Módulo resiliente y el Estado Físico del Suelo.



FUENTE: Sandefur, 2003.

#### 2.4.2.2 Características del módulo resiliente en suelos granulares

Al igual que en los suelos finos, los materiales granulares también se ven afectados en su determinación del módulo por una serie de factores que influyen su comportamiento, tales como: la presión de confinamiento y el estado de esfuerzos, el contenido de agua, el contenido de finos, entre otros. A continuación se presentan algunas consideraciones sobre ellos.

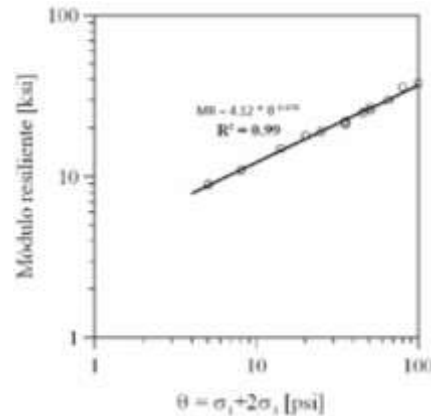
##### 1. Presión de Confinamiento y Estado de Esfuerzos

A diferencia de los materiales finos, los materiales granulares si presentan una dependencia directa en su magnitud del módulo con el estado de esfuerzos al que estén sometidos, principalmente con la presión de confinamiento.

Investigadores como Heydinger, 1996; Theyse, 2002; Lekarp y Isacsson, 2001, entre otros, han demostrado que el módulo resiliente en materiales granulares posee una importante relación con el esfuerzo de confinamiento aplicado, así como una proporcionalidad directa en su respuesta con la sumatoria de los esfuerzos principales.

Elliott y David (1989), resaltaron en sus investigaciones la influencia del estado de esfuerzos aplicado en el valor del módulo resiliente obtenido (ver figura 7).

Figura 7 Influencia del estado de esfuerzos en el valor del módulo resiliente.



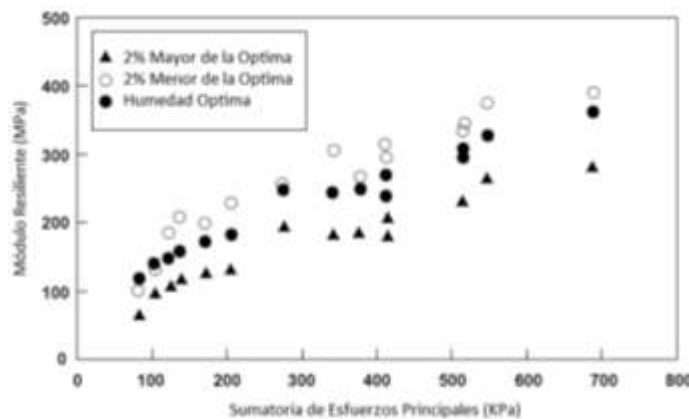
FUENTE: Reyes y Rondón, 2008.

## 2. Contenido de Agua

Haynes y Yoder (1963), reportaron que el módulo resiliente tiene una marcada influencia con el contenido de humedad, presentando una disminución en su magnitud al incrementarse la cantidad de agua en el material. Una investigación que respalda Hicks y Monosmith (1971), donde mostraron que el Módulo resiliente se reducía cuando se incrementaba el contenido de humedad de la muestra por encima de su valor óptimo.

Tiam (1998), en un estudio experimental estableció la dependencia del módulo resiliente ante la variación del contenido de agua de las muestras (ver figura 8). Los resultados demostraron que en la medida que se aumenta el contenido de humedad, el módulo encontrado disminuía para estados de esfuerzos similares.

Figura 8 Variación del módulo resiliente en función de la humedad de compactación.



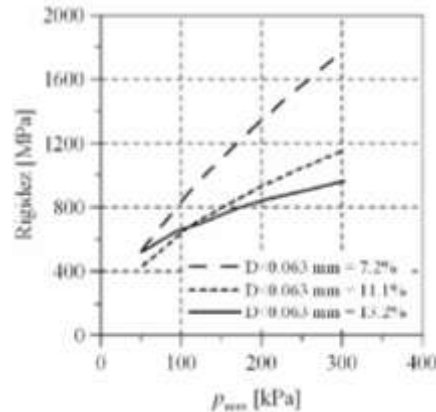
FUENTE: Davies, 2004.

### 3. Contenido de Finos

Algunos estudios como los de Allen y Thompson (1974), Dawson (2000) y Tutumluer (2003), han concluido que el contenido de finos presente en una material granular tiende a disminuir su rigidez, influyendo en su respuesta resiliente cuando se encuentra sometido a carga axial dinámica.

Magnusdottir y Erlingsson (2002) obtuvieron una reducción significativa en la magnitud del módulo cuando se pasó de un 7.2% a un 13.2% de contenido de finos (ver figura 9).

**Figura 9 Disminución del módulo con el incremento del contenido de finos.**



**FUENTE: Reyes y Rondón, 2008.**

Algunas investigaciones han obtenido conclusiones opuestas, como la de Coronado (2005), quién reportó un incremento en el valor del módulo cuando el contenido de finos se incrementó de un 7% a un 10%.

Aunque no existe un consenso definido entre el contenido de finos y su comportamiento en el valor del módulo resiliente, si es claro que a grandes contenidos de finos, el material granular tiende a disminuir su rigidez y a comportarse más como un material fino que como un material grueso.

## 2.5 MODELOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

En la literatura se encuentran algunos modelos matemáticos que han sido desarrollados para la determinación del módulo resiliente tanto para materiales finos como para materiales gruesos. Estos modelos constitutivos buscan correlacionar el módulo resiliente con los esfuerzos actuantes y las propiedades fundamentales del material.

Para acercarnos un poco más a la determinación del Módulo resiliente, presentaremos los principales modelos matemáticos encontrados en la literatura.

### 2.5.1 MODELO DEL ESFUERZO BULK

El modelo del esfuerzo bulk o también conocido como modelo K- $\theta$ , fue considerado el mejor procedimiento para la determinación del módulo resiliente de suelos granulares y fue propuesto por Seed y otros (1967).

Su estimación se puede realizar por medio de la siguiente formulación:

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

Los parámetros que conforman la ecuación No 2 están definidos así:

Este modelo describe el comportamiento resiliente de un material sólo como función de su esfuerzo de confinamiento, sin considerar el efecto generado por el esfuerzo desviador.

### 2.5.2 MODELO DEL ESFUERZO DESVIADOR

La guía de diseño AASHTO recomienda el modelo del esfuerzo desviador para la estimación del módulo resiliente para los suelos de grano fino. Este modelo está expresado por la siguiente ecuación:

$$MR = k_3 \sigma_d^{k_4}$$

La desventaja del modelo del esfuerzo desviador es que no representa el efecto de la presión de confinamiento sobre el material.

### **3 DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO: REVISIÓN DE LITERATURA EXISTENTE.**

#### **3.1 GENERALIDADES**

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.

En Colombia, 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 ó 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 ó la vida residual o remanente de la misma, entre otros.

#### **3.2 CONCEPTO DE DEFLEXIÓN**

Las solicitaciones de carga inducen a la estructura de pavimento a un desplazamiento en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas, generalmente del orden de centésimas o milésimas de milímetro. Este desplazamiento vertical es conocido con el nombre de deflexión.

Cuando este desplazamiento vertical se presenta bajo una carga normalizada producto de la utilización de un equipo como el deflectómetro de impacto, sus resultados son útiles para poder interpretar el estado o condición estructural de un pavimento.

Las deflexiones pueden determinar el estado crítico existente en alguna de las capas interiores de la estructura de un pavimento, razón por la cual se podrá encontrar un pavimento con daños superficiales que presente bajas deflexiones y otro en buen estado con altas deflexiones.

Entre las deflexiones más utilizadas se encuentran: la deflexión máxima o valor máximo de desplazamiento vertical bajo la aplicación de la carga y el área del cuenco de deflexiones.

### 3.3 METODOS NO DESTRUCTIVOS

Los métodos de evaluación no destructivos se han venido implementando debido a que presentan ventajas importantes frente a otros métodos convencionales, entre las que se pueden mencionar: rapidez en su ejecución, confiabilidad en los datos recopilados, economía, no requieren toma o extracción de muestras para ensayos de laboratorio, las cargas que se utilizan simulan la acción de un vehículo en movimiento, entre otros.

### 3.4 DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

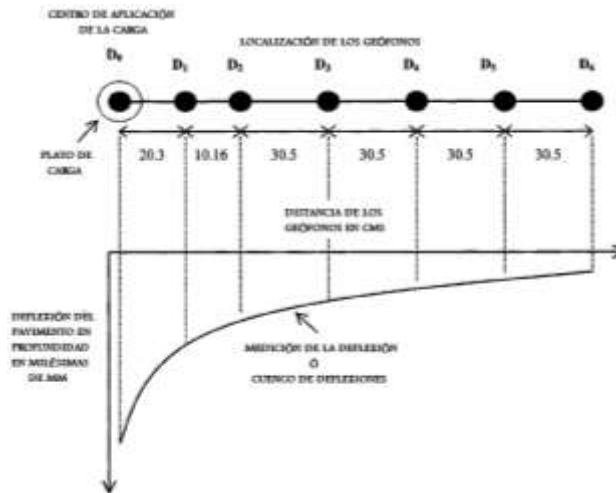
#### 3.4.1 GENERALIDADES

El deflectómetro de impacto o también conocido como FWD, es el equipo técnicamente más avanzado que existe en la actualidad para simular y medir la respuesta de un pavimento, presentando dos características importantes a saber.

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/hr.

La segunda característica es que 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 6 a 9 puntos localizados a distancias que varían entre 20 y 180 cm del centro del impacto (ver figura 10).

Figura 10 Cuenco de deflexiones bajo la aplicación del plato de carga.



FUENTE: Mehta y Roque, 2003.

Los dispositivos encargados de captar la deformación superficial del pavimento son denominados geófonos y están localizados en la parte inferior del FWD, separados entre sí por un espaciamiento predefinido.

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.

**Figura 11 Componentes básicos de medición del FWD – JILS 20 propiedad de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá.**



**FUENTE:** Elaboración propia, 2010.

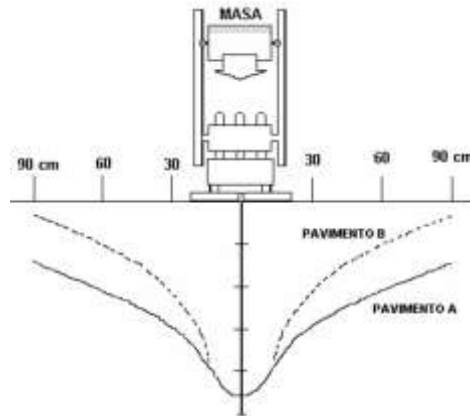
### 3.4.2 EL ÁREA DEL CUENCO DE DEFLEXIONES

Su estimación de cálculo fue desarrollada por el Ingeniero Mario Hoffman en el año 1981 y fue adoptada para fines de análisis y diseño por la guía AASHTO. Su formulación está definida por la siguiente expresión:

$$Area = 150 * \left[ 1 + 2 \left( \frac{d30}{d0} \right) + 2 \left( \frac{d60}{d0} \right) + \frac{d90}{d0} \right]$$

El valor del área nos permite diferenciar el comportamiento de dos estructuras de pavimento que puedan llegar a tener entre sí el mismo valor de deflexión máxima (ver figura 12). Aunque el pavimento A y B poseen la misma deflexión máxima ( $d_0$ ), su valor de Área del Cuenco de deflexión será diferente; mayor para el pavimento A que para la estructura B, lo que implica que el comportamiento estructural del primero ante la acción de las cargas será mejor que para el segundo.

**Figura 12 Representación de dos cuencos de deflexión diferentes con un mismo valor de deflexión máxima (d<sub>0</sub>).**



FUENTE: Shahin, 1994.

Como resultado del análisis de una serie de datos obtenidos del cuenco de deflexión y de la deflexión máxima, ha sido posible establecer una serie de criterios básicos para la adecuada interpretación del comportamiento estructural de un pavimento (ver tabla 1).

**Tabla 1 Interpretación del comportamiento de un pavimento con base en resultados del área del cuenco de deflexión y la deflexión máxima**

ACD	d <sub>0</sub>	INTERPRETACIÓN
Baja	Baja	Pavimento Débil / Subrasante Fuerte
Baja	Alta	Pavimento Débil / Subrasante Débil
Alta	Baja	Pavimento Fuerte / Subrasante Fuerte
Alta	Alta	Pavimento Fuerte / Subrasante Débil

FUENTE: De Solminihac, 2001.

### 3.4.3 DEFLEXIÓN MÁXIMA

Si un cuenco de deflexión generado por un equipo FWD posee un alto valor de deformación bajo el centro de aplicación de carga es posible que indique una baja capacidad de soporte en alguna de las capas de la estructura y/o en la subrasante.

Para poder comparar diversos tramos de pavimento a partir de su deflexión máxima se hace necesario normalizar la deflexión al igual que la carga aplicada. La fórmula establecida para dicha normalización se presenta a continuación:

$$do \text{ normalizada} = \frac{do * \text{carga normalizada}}{\text{carga aplicada}}$$

### 3.4.4 FACTORES QUE INCIDEN EN LA MEDICIÓN DE DEFLEXIONES

Entre los diversos factores que inciden en las mediciones de deflexión los más relevantes se pueden asociar con la estructura del pavimento, factores intrínsecos a los equipos de medición, así como a las condiciones ambientales al momento del ensayo; este último, asociado principalmente al parámetro de la temperatura.

#### 3.4.4.1 Temperatura

La temperatura como factor climático y ambiental es un agente externo de gran influencia en los análisis de deflexión, el cual afecta directamente la rigidez de la carpeta asfáltica, cuyas propiedades visco elásticas son dependientes de esta variación.

Debido a esta variabilidad, se hace necesario realizar una corrección para conocer la temperatura efectiva del pavimento al momento del ensayo. Algunos estudios sugieren que la temperatura puede ser tomada al tercio o a la mitad de la capa bituminosa, concordando en que no es aconsejable emplear la temperatura tomada sobre la superficie de la carpeta. Esta medición se puede realizar a través de orificios construidos directamente sobre el pavimento ó a partir de estimaciones basadas en correlaciones con datos ambientales.

Dentro de las correlaciones más empleadas se encuentra la del instituto del asfalto, presentada a continuación.

$$M_p = M_a * \left(1 + \frac{1}{z + 4}\right) - \frac{34}{z + 4} + 6$$

$M_p$  = Temperatura media de la mezcla (°F).

$M_a$  = Temperatura media ponderada del aire (°F).

$z$  = Profundidad a la cual se estima la temperatura de la mezcla (in). Por recomendación del Instituto del Asfalto, la profundidad  $z$  se debe tomar en el punto medio de la capa.

Se recomienda para obtener datos confiables no hacer medición de deflexiones con temperaturas de pavimento inferiores a 2°C o superiores a 40°C.

Pavimentos flexibles que posean capas asfálticas inferiores a 5 cm no tendrán la necesidad de realizar correcciones por temperatura; pero aquellos con espesores superiores deberán aplicar un coeficiente de corrección ( $C_t$ ), el cual puede ser calculado por medio de la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{1}{1 - 0.0008 * h_1 * (20 - t)}$$

Donde:

$C_t$  = Coeficiente de corrección por temperatura.

$h_1$  = Espesor de la carpeta asfáltica (cm).

$t$  = Temperatura de la carpeta asfáltica al momento del ensayo (°C).

Por efectos de temperatura las deflexiones se estandarizan a una temperatura de 20 °C, tal como lo recomienda la guía AASHTO mediante la siguiente expresión:

$$T(t) = \frac{d(68^{\circ}F)}{d(t)}$$

Donde:

T(t) = Factor de corrección por temperatura ó Ct.

d (68 °F) = Deflexión estandarizada a 20 °C.

d (t) = Deflexión medida a temperatura ambiente.

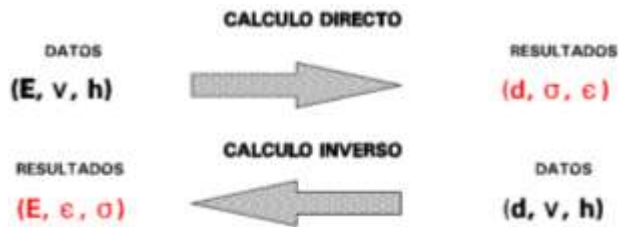
### 3.5 FILOSOFÍA DEL RETROCÁLCULO

Las diferentes herramientas computacionales empleadas para el diseño de pavimentos permiten calcular los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones de una estructura determinada si se conoce el valor de la carga aplicada, el espesor de las capas de pavimento y los parámetros estructurales de las mismas, como su módulo y su coeficiente de Poisson. Por medio de estos procedimientos de cálculo, es posible obtener los valores de deflexión que se originarán en la superficie de la estructura a diferentes distancias de la carga, obteniendo de esta manera la curva de deformación del pavimento.

El proceso de retrocálculo es una técnica empleada para evaluar la capacidad estructural de un pavimento que consiste en la determinación de los valores de los módulos de cada una de las capas a partir de las deflexiones medidas sobre su superficie.

Este procedimiento también es conocido como cálculo inverso debido a que los datos de entrada son la curva de deformación del pavimento, el espesor de cada una de las capas del pavimento y la carga aplicada a la estructura (ver figura 13).

**Figura 13 Datos requeridos para el cálculo directo y el cálculo inverso.**

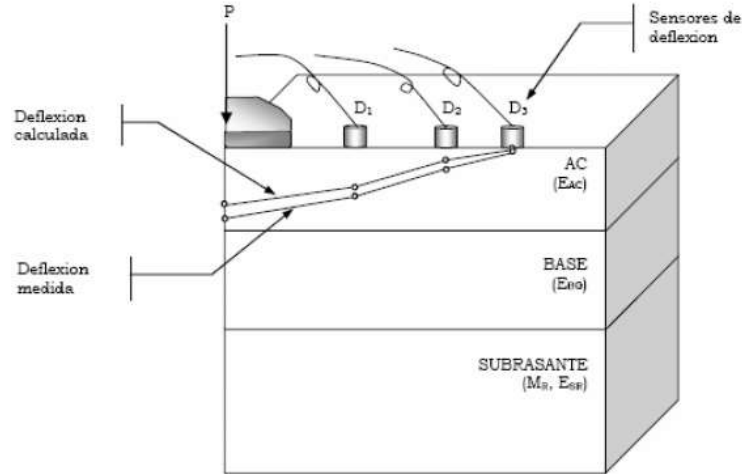


**FUENTE:** Nociones básicas de cálculo inverso de firmes.

El retrocálculo involucra el cálculo de deflexiones teóricas asumiendo en primera instancia algunos valores predeterminados para los módulos de cada una de las capas.

Estos valores teóricos de deflexión son comparados con los valores de deflexión medidos a través de equipos como el FWD. Mediante un proceso iterativo se ajustan las curvas de deformación teóricas y medidas hasta que presenten un ajuste razonable; cuando esto ocurre, se considera que los módulos obtenidos son característicos de la respuesta del pavimento (ver figura 14).

Figura 14 Comparación del cuenco de deflexión medido y teórico.



FUENTE: Velásquez, 2005.

La adecuada convergencia o no de estos valores de deflexión puede ser determinada por medio del parámetro del error medio cuadrático (RMS). Se estima que al final de un correcto proceso de retrocálculo el valor del error medio cuadrático (RMS) deberá ser igual o inferior a un 2% (ver anexo 7).

La guía de diseño AASHTO determina el módulo resiliente de la subrasante tomando como datos de entrada los valores captados por los geófonos a una distancia lo suficientemente alejada del plato de carga, de tal forma que la medición obtenida corresponda exclusivamente a la respuesta generada por el material de subrasante (ver anexo 7).

Debido a que generalmente los valores de los módulos de subrasante son mayores por el método de retrocálculo que por resultados obtenidos de ensayos de laboratorio, la guía de diseño AASHTO ha estimado que se debe aplicar un factor de corrección que otorgue mejores aproximaciones de módulo para los valores retrocalculados. Este factor de corrección se asume igual a 0,33 y para su uso no se tiene en cuenta el tipo de suelo existente en la subrasante.

#### **4 RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE DE LABORATORIO Y EL ENCONTRADO POR METODOLOGÍAS DE RETROCÁLCULO.**

##### **ANTECEDENTES**

A partir del factor de corrección determinado por la guía AASHTO para módulos retrocalculados obtenidos para suelos de subrasante, se han desarrollado algunas investigaciones relacionadas sobre el tema, que han permitido encontrar que el coeficiente adoptado por esa guía de diseño debe ser empleado con precaución, más aún, cuando es susceptible de variación en función del tipo de material sobre el cual se haya adelantado la investigación.

A continuación se describe de forma simplificada algunos trabajos en los cuales se han determinado factores de corrección.

Petersen, Wahr y Palma, investigaron en Chile la relación entre el módulo resiliente (MR) obtenido en ensayos de laboratorio y el obtenido mediante retrocálculo de deflexiones medidas con deflectómetro de impacto.

Para cumplir con este propósito realizaron ensayos de laboratorio y campo, siguiendo los procedimientos definidos en la guía AASHTO 1993, logrando determinar un factor de ajuste que permite estimar el MR de laboratorio considerado como patrón, a partir del valor obtenido por retrocálculo, para ser utilizado en el diseño y evaluación de pavimentos en el marco del método de diseño propuesto por AASHTO.

El estudio se realizó sobre una estructura de pavimento flexible, encontrando materiales de subrasante de tipo granular con presencia de limo y arcilla, sobre los cuales se estimaron 12 puntos para medidas de deflexión.

Una vez realizadas las mediciones de deflexión, se procedió al análisis de éstas mediante el método propuesto por AASHTO, obteniendo de esta forma el módulo resiliente retrocalculado.

El laboratorio se ejecutaron 24 ensayos de módulo resiliente, dos por cada punto donde se midieron las deflexiones.

Con base en los resultados obtenidos se propuso un factor de ajuste igual a 0,45, formulando la siguiente relación:

$$MRL = 0,45 * MRR$$

donde:

MRL = Módulo resiliente hallado en laboratorio.

MRR = Módulo resiliente obtenido por retrocálculo.

Por otra parte, Fuentes, Sepúlveda y Gaete, también investigadores chilenos, realizaron un procedimiento similar seleccionando 5 sitios para realizar los ensayos, donde se obtuvieron 3 muestras de suelos gruesos (material granular) y 6 muestras de suelos finos (arena, arcilla y limo), que posteriormente se ensayaron según la guía AASHTO T294-92.

Paralelo al muestreo se midieron las deflexiones con FWD, realizando un total de 9 pruebas, la misma cantidad de ensayos de módulo resiliente ejecutados en laboratorio.

Los resultados obtenidos están discriminados según el tipo de suelo, así:

Correlación para suelos finos:

$$MRL = 0.94 * MRR$$

Correlación para suelos gruesos:

$$MRL = 0.90 * MRR$$

donde:

MRL = Módulo resiliente hallado en laboratorio.

MRR = Módulo resiliente obtenido por retrocálculo.

Otros investigadores como George (2003), recomendaron a partir de su trabajo realizado en la ciudad de Mississippi el uso de los siguientes factores de corrección, según el tipo de suelo existente en la subrasante: 0,65 para suelos finos y 0,51 para suelos granulares.

## 5 METODOLOGÍA

El actual trabajo de investigación está dividido en tres etapas claramente definidas dentro del proyecto; la primera de ellas está relacionada con la operación y funcionamiento del FWD de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá; la segunda etapa gira en torno al desarrollo de un trabajo de campo mediante la ejecución de un ensayo de deflectometría no destructivo y la tercera, es la realización de una serie de ensayos de laboratorio, encaminados a la caracterización física y dinámica de los materiales que conforman la estructura del pavimento.

### OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL FWD

Una de las primeras actividades que se desarrolló al inicio de la investigación fue el trabajo implementado en el conocimiento de operación y funcionamiento del FWD, el cual es el equipo central sobre el que se basa una parte importante del trabajo de investigación (ver anexo 1).

### TRABAJO DE CAMPO

Para el desarrollo del trabajo de campo fue necesaria la ejecución de una serie de actividades que permitieran obtener el máximo conocimiento posible de las condiciones presentes en el área donde se llevaría a cabo la investigación, las cuales se relacionan a continuación:

- a. Determinación del área adecuada donde se localizaría el tramo de prueba.
- b. Identificación de las condiciones existentes en el área de investigación durante la etapa de construcción de la estructura de pavimento.
- c. Extracción de muestras correspondientes a los materiales utilizados dentro de la etapa de construcción del tramo de prueba.
- d. Realización de pruebas de deflectometría de impacto con FWD.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Parte fundamental dentro de la presente investigación es conocer las propiedades más relevantes de los materiales que conforman el tramo de análisis, para ello se hizo indispensable el desarrollo de las siguientes actividades:

- a. Caracterización física básica de los materiales.
- b. Caracterización dinámica de los materiales.

### METODOLOGIA PARA RETROCÁLCULO DE MÓDULOS

La obtención de los módulos retrocalculados se realizará por medio de la utilización de varios métodos dispuestos para tal fin, entre los que se encuentran formulaciones de cálculo directo, ecuaciones desarrolladas a partir de regresiones y dos herramientas computacionales, una de uso libre y otra con licencia que pertenece a la Universidad Nacional.

## 5.1 TRABAJO DE CAMPO Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Para el desarrollo del trabajo de campo fue necesaria la ejecución de una serie de actividades encaminadas a la selección del tramo de prueba apropiado, según las consideraciones particulares planteadas al inicio de la investigación.

### 5.1.1 DETERMINACIÓN DEL ÁREA ADECUADA DONDE SE LOCALIZARÍA EL TRAMO DE PRUEBA

#### 5.1.1.1 Tipo de Estructura y Localización

El trabajo de investigación se desarrolló sobre una estructura de pavimento flexible localizada sobre la calle 170 en intersección con la Autopista Norte (ver figura 15).

Figura 15 Localización del tramo de prueba en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá.



FUENTE: Google Earth, 2009.

#### 5.1.1.2 Condiciones existentes en el área de investigación durante la etapa de construcción

El tramo de prueba está conformado por una distribución de materiales en profundidad típica de un pavimento flexible, así: su capa superior es una carpeta asfáltica de 24 cm de espesor, dividida en 6 cm de una mezcla densa MD12 y 18 cm de una MD20; subyaciendo esta carpeta se encuentra una capa de materiales granulares instalados en dos capas, la primera de ellas es una base granular y la segunda una subbase granular, cada una de 15 cm de espesor; por último, como material de fundación se encuentra una subrasante conformada por un material granular remanente de sitio ó en algunos casos, un material de mejoramiento tipo b600 empleado como mejoramiento.



con una categoría de tránsito T8 según el Instituto Nacional de Vías INVIAS. La longitud acumulada del tramo de prueba en donde se desarrollaron las deflectometrías fue de 600 m aprox.

### 5.1.2 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN OBRA.

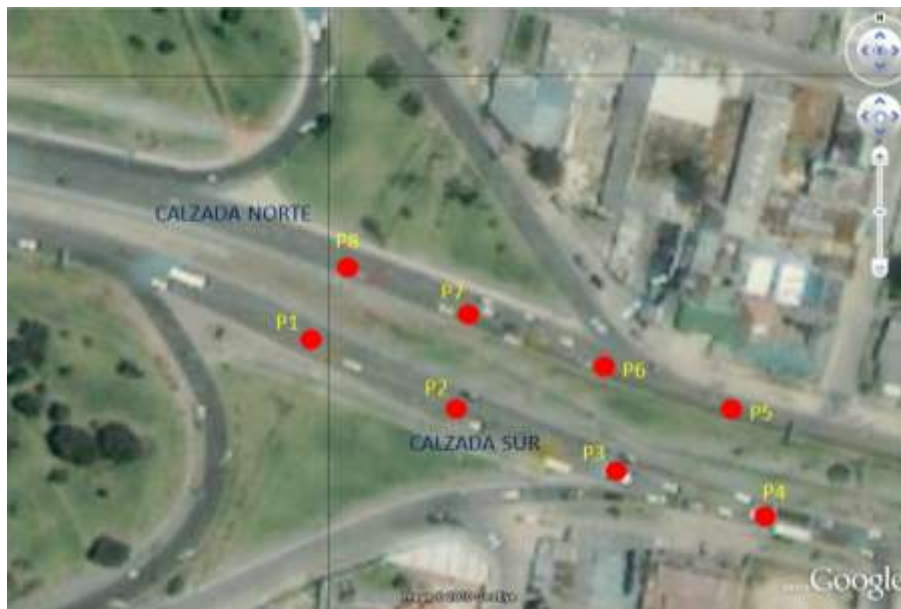
La recolección de muestras de los materiales instalados en la estructura de pavimento (base, subbase, b600 y subrasante granular) se realizó de forma alterada, tomándolos directamente de los apilamientos de material que se encontraban depositados a lo largo de la vía ó durante el proceso de excavación; esto debido a la celeridad con que se desarrollaban los trabajos de construcción de la vía.

La muestra de la capa asfáltica fue obtenida a través de la toma de un núcleo extraído de campo.

### 5.1.3 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO CON FWD

La toma de deflexiones de campo se realizó con el equipo FWD JILS-20 y estuvo conformada por un total de 8 puntos de control distribuidos uniformemente a lo largo de todo el tramo de prueba (ver figura 18).

Figura 18 Distribución de los puntos de toma de deflexiones a lo largo del tramo de prueba.



FUENTE: Google Earth, 2009.

La distribución de estos puntos de control se realizó de la siguiente forma: cuatro puntos en el sentido Occidente – Oriente, sobre la calzada Sur y los cuatro puntos restantes en el sentido Oriente – Occidente, sobre el costado Norte de la Avenida Calle 170.

El espaciamiento entre cada uno de los puntos de control se estimó conveniente en 50 metros aproximadamente, con base en la información consultada y adoptada por firmas de gestión vial que realizan este tipo de ensayos de campo.

La toma de deflexiones se realizó en dos franjas horarias diferentes en el mismo día, con el fin de determinar la influencia de la temperatura en la captura de las deflexiones (ver tabla 2).

**Tabla 2 Relación de horarios en el cual se ejecutaron los ensayos de deflectometría.**

PRUEBA No 1		PRUEBA No 2	
ESTACIÓN	Hora	ESTACIÓN	Hora
P1	11:54	P1	15:05
P2	11:57	P2	15:08
P3	12:00	P3	15:12
P4	12:03	P4	15:15
P5	12:08	P5	15:18
P6	12:10	P6	15:23
P7	12:14	P7	15:27
P8	12:16	P8	15:30

La Hora del día se encuentra en formato de 24 horas.  
Las 15:05 horas corresponden a las 3:05 pm.

**FUENTE: Elaboración Propia, 2010.**

Sobre cada punto de control se realizaron 3 pruebas de impacto con una carga nominal de 9000 libras, según los lineamientos usados para análisis deflectométricos por entidades como el IDU.

## 5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales recopilados fueron sometidos a ensayos rutinarios de caracterización y clasificación, así como a ensayos dinámicos, estos últimos enfocados en determinar su comportamiento resiliente.

### 5.2.1 ENSAYOS RUTINARIOS DE CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN

Debido al suministro de algunos resultados de ensayos de laboratorio realizados por parte del contratista, se decidió realizar dentro de la investigación algunos ensayos básicos, que permitieran corroborar que los materiales recopilados en obra si correspondían a los materiales empleados para la construcción del tramo de prueba (ver tabla 3).

**Tabla 3 Resumen de ensayos de caracterización básica realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.**

MATERIAL	ENSAYOS DE LABORATORIO			
	Granulometría	Límites de Atterberg	Equivalente de Arena	Proctor Modificado
Base Granular	2	2	2	1
Subbase Granular	2	2	2	1
Granular B-600	2	2	2	1

**FUENTE: Elaboración Propia, 2010.**

## 5.2.2 ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE

Los ensayos de módulo resiliente se llevaron a cabo sobre las muestras de material granular y de subrasante, mediante el seguimiento de la norma de ensayos de laboratorio E-156-07 propuesta por el Instituto Nacional de Vías, INVIAS, la cual está basada en la metodología planteada por la guía de diseño AASHTO en su ensayo T-307.

Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Javeriana sede Bogotá.

En total se realizaron tres ensayos para cada material, variando el contenido de humedad al cual se compactaba cada probeta, con el fin de analizar el comportamiento resiliente de los materiales ante los cambios en el contenido de agua.

Para la selección del contenido de humedad óptimo al cual se deberían compactar los materiales, se decidió analizar la información de las densidades de campo tomadas en obra al momento de recibir la compactación de las capas por parte de la interventoría del proyecto.

### 5.2.2.1 Determinación del contenido de humedad requerido para los materiales ensayados

El primer contenido de humedad que se debía obtener para cada material era el correspondiente a su humedad óptima, razón por la cual se empleó para ello los resultados de las densidades de campo medidas por el contratista. El procedimiento adelantado para el material de base granular se encuentra consignado en el anexo 4.

De la misma manera como se determinó el contenido de humedad para la base granular, se realizaron los procedimientos respectivos para los materiales de subbase, b-600 y subrasante.

En la tabla 4 se resumen los valores de humedad y densidad a los cuales se proyecta compactar las diferentes probetas para el ensayo de módulo resiliente.

**Tabla 4 Resumen de humedades y densidades adoptadas para los ensayos de módulo resiliente.**

MATERIAL	Humedad óptima del PM (%)	Densidad seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Rango de humedades para compactación de probetas (%)			Densidad escogida para compactar probetas (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación (% PM)
			-3%	Óptima	+3%		
Base Granular	9,2	2118,0	5,4	8,4	11,4	2076,0	98,0
Subbase Granular	8,6	2132,0	5,0	8,0	11,0	2025,0	95,0
Granular B-600	8,1	2100,0	3,0	6,0	9,0	1995,0	95,0
Subrasante	8,3	2065,0	4,8	7,8	10,8	2024,0	98,0

FUENTE: Elaboración Propia, 2010

### 5.2.2.2 Elaboración de las probetas en laboratorio

Las probetas compactadas en laboratorio presentan unas dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, según el tamaño de muestra que permite albergar la cámara triaxial.

Para cumplir con la relación de 1 a 5 en el tamaño máximo de partícula comparado con el diámetro de la probeta, fue necesario tamizar los materiales por la malla de ¾ de pulgada.

El proceso de compactación se realizó por medio de impacto, similar al procedimiento del Proctor modificado, tratando de mantener constante la densidad seca escogida para cada material.

En el anexo 5 se encuentra un registro fotográfico del procedimiento de conformación de las probetas, así como de su montaje en la cámara triaxial.

### **5.2.3 MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

El ensayo de módulo dinámico realizado sobre las capas asfálticas es una prueba no destructiva que se desarrolla por medio de la implementación del método de tensión indirecta establecida bajo la norma del Instituto Nacional de Vías, INVIAS E-749-07.

Debido a la presencia de dos diferentes tipos de mezclas se decidió ensayar cada una de ellas para estimar si la variación en el valor del módulo era significativa ó si por el contrario, era válido considerarlas como un solo material asfáltico, con el fin de poder comparar los resultados con las metodologías de retrocálculo empleadas.

En el anexo 6 se encuentran ilustrados los dos tipos de mezclas asfálticas ensayadas, así como algunos de los resultados de caracterización realizados en estos materiales.

## **5.3 METODOLOGÍA PARA RETROCÁLCULO DE MÓDULOS**

Los procedimientos de retrocálculo son muy usados para obtener los módulos resilientes y dinámicos de cada una de las capas que forman parte de la estructura de un pavimento, utilizando para ello las mediciones de deflexión registradas por equipos como el deflectómetro de impacto.

Dentro de la presente investigación se emplearán tres metodologías para calcular los módulos de las diferentes capas. Las metodologías a emplear son: formulaciones para cálculo directo, ecuaciones obtenidas a partir de procesos de regresión y software usuales aplicados en nuestro medio (en el anexo 7 se describen las diferentes metodologías empleadas).

Se debe destacar que las formulaciones y/o ecuaciones empleadas dentro de la presente investigación, sólo son aplicables para estructuras de pavimentos compuestas por un sistema tricapa: una carpeta asfáltica, una capa granular y un material de subrasante; razón por la cual, y con el fin de comparar los resultados obtenidos para cada capa por las diferentes metodologías, inicialmente se simplificará la estructura presente en el tramo de prueba de un sistema de cinco a uno de tres capas, así: una carpeta asfáltica de 24 cm de espesor, un material granular de 30 cm de espesor y una capa de subrasante.

Para el empleo de las metodologías de retrocálculo los valores de deflexión deberán estar corregidos previamente por carga y temperatura.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 6.1 DEFLEXIONES OBTENIDAS EN EL TRABAJO DE CAMPO

Con los valores de deflexión medidos en campo fue posible la construcción del cuenco de deflexiones, un parámetro empleado dentro del estudio del comportamiento y de la capacidad estructural del pavimento, destacando que es la información base más importante para la determinación de los módulos de las diferentes capas por medio de la utilización de métodos de retrocálculo.

En total se realizaron 16 pruebas de deflectometría en ocho puntos de control, divididas en dos jornadas durante el día (ver tabla 2). La variación de la temperatura superficial del pavimento entre una jornada y otra fue aproximadamente de cinco grados centígrados (ver tabla 5).

**Tabla 5 Variación de la temperatura tomada por el FWD durante las pruebas de deflectometría.**

ESTACIÓN	PRUEBA No 1 (Jornada Mañana)				PRUEBA No 2 (Jornada Tarde)			
	Temperatura del Aire		Temperatura Superficial del Pavimento		Temperatura del Aire		Temperatura Superficial del Pavimento	
	° F	° C	° F	° C	° F	° C	° F	° C
P 1	83.4	28.6	103.2	39.6	75.3	24.1	93.1	33.9
P 2	83.4	28.6	102.8	39.3	75.3	24.1	93.2	34.0
P 3	83.4	28.6	103.1	39.5	75.3	24.1	93.0	33.9
P 4	83.4	28.6	103.2	39.6	75.3	24.1	93.0	33.9
P 5	83.4	28.6	103.0	39.4	75.3	24.1	93.4	34.1
P 6	83.4	28.6	102.3	39.1	75.3	24.1	93.1	33.9
P 7	83.4	28.6	101.9	38.8	75.3	24.1	93.3	34.1
P 8	83.4	28.6	102.7	39.3	75.3	24.1	93.2	34.0

FUENTE: Elaboración Propia, 2010.

En cada punto de control se realizaron tres impactos, lo que permitió obtener el mismo número de datos de deflexión por cada geófono empleado. El total de las mediciones de deflexión obtenidas en campo se relacionan en el anexo 8.

#### 6.1.1 CUENCO DE DEFLEXIONES

Para generar los cuencos de deflexión en cada punto de control es necesario realizar un promedio aritmético tanto para el valor de la carga, como para las lecturas de deflexión medidas en campo, esto con el fin de obtener una información unificada que represente la respuesta del pavimento (ver anexo 9).

#### 6.1.2 CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES POR EFECTOS DE CARGA

Debido a la variabilidad en las magnitudes de carga aplicadas durante las pruebas de deflectometría, se hace indispensable normalizar las deflexiones a un valor de carga nominal de 9000 libras, de tal forma que puedan ser comparables entre sí los cuencos de deflexión obtenidos

sobre el tramo de prueba. Para este procedimiento se empleará la expresión relacionada en el numeral 3.4.3.

### 6.1.3 CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES POR EFECTOS DE TEMPERATURA

#### 6.1.3.1 Corrección para deflexiones medidas bajo el centro del plato de carga

Para efectuar esta corrección fue necesario evaluar la temperatura promedio de la carpeta asfáltica (Mp) al momento de las pruebas, así como determinar el coeficiente de corrección por temperatura (Ct), que permite ajustar las deflexiones a una temperatura de pavimento de 20°C, según los procedimientos descritos en el numeral 3.4.4.1.

Como valor promedio de la temperatura del aire (Ma), se empleó el registro de temperatura ambiente capturado por el sensor del FWD al momento de la realización de la prueba.

Los resultados obtenidos para los coeficientes de corrección por temperatura (Ct) se relacionan en la tabla 6.

**Tabla 6 Coeficientes de corrección por temperatura Ct, obtenidos para cada jornada de pruebas.**

Estación	Espesor capa asfáltica (cm)	Jornada	Temp. Prom. Pavim. (°C)	Ct
P1 a P8	24.0	Prueba 1	35.0	0.78
		Prueba 2	30.0	0.84

FUENTE: Elaboración Propia, 2010.

#### 6.1.3.2 Corrección para deflexiones medidas a cierta distancia del centro del plato de carga

En Colombia, según el Instituto Nacional de Vías INVIAS, es usual que los propietarios de deflectómetros no consideren el efecto de la temperatura en las deflexiones medidas por fuera del plato de carga, evitando la aplicación de un factor de corrección.

Kim y Ranjithan (2002) en investigaciones realizadas para el Transportation Research Board TRB, propusieron una formulación para determinar la distancia efectiva radial (D), hasta la cual se puede considerar que la temperatura de las capas asfálticas incide en el valor de las deflexiones medidas por un equipo FWD. Su expresión fue la siguiente:

$$D (mm) = 4.75 * Hac - 413$$

Donde HAC es el espesor de las capas asfálticas (mm).

Según esta expresión, es indispensable dentro de la investigación determinar valores de corrección por temperatura para deflexiones alejadas hasta 72 cm del centro de aplicación de la carga, es decir, para los geófonos situados a 20, 30, 45 y 60 cm.

Se debe tener en cuenta además para determinar estos factores el espesor de la carpeta asfáltica, ya que entre menor sea este último, mayores serán los coeficientes de corrección a estimar.

El procedimiento desarrollado para determinar estos coeficientes se encuentra consignado en el anexo 10.

En la tabla 7 se relacionan los factores de reducción por temperatura para diferentes distancias del eje del impacto que se deben aplicar a las deflexiones medidas en campo, según la temperatura del pavimento existente al momento de la prueba.

**Tabla 7 Coeficientes de corrección por temperatura para diferentes separaciones de geófonos, para un espesor de capa asfáltica de 24 cm.**

Temp. Pavimento (° C)	Distancia al Centro del Plato de Carga (cm)				
	0	20	30	45	60
	Coeficientes de corrección por temperatura				
30	0.840	<b>0,902 *</b>	0.924	<b>0,957 *</b>	0.964
35	0.780	<b>0,854 *</b>	0.883	<b>0,924 *</b>	0.949

*\* Valores Estimados*

FUENTE: Elaboración Propia, 2010.

#### 6.1.4 DEFLEXIONES CORREGIDAS POR EFECTOS DE TEMPERATURA

Con los resultados contenidos en la tabla 7, se cuenta con todos los coeficientes de corrección por temperatura para ser aplicados a los valores de deflexión medidos en campo, después de haber sido corregidos previamente por carga.

Las deflexiones corregidas con sus correspondientes cuencos de deflexión se encuentran consignadas en el anexo 11.

## 6.2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Una descripción de los resultados obtenidos para cada uno de los materiales recopilados se presenta a continuación.

### 6.2.1 BASE GRANULAR

#### 6.2.1.1 Ensayos de caracterización física básicos

Un resumen de los resultados de caracterización obtenidos para el material de base granular se presentan en el anexo 12.

#### 6.2.1.2 Ensayos de módulo resiliente

En la tabla 8 se presenta un resumen de las humedades y densidades reales a las cuales se compactaron las probetas para la ejecución del ensayo de módulo resiliente.

**Tabla 8 Humedades y densidades de las probetas elaboradas en laboratorio para el ensayo de MR sobre el material de base granular.**

Material	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)
Base Granular	1,87	6,19	2,01	8,88	1,96	10,57

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

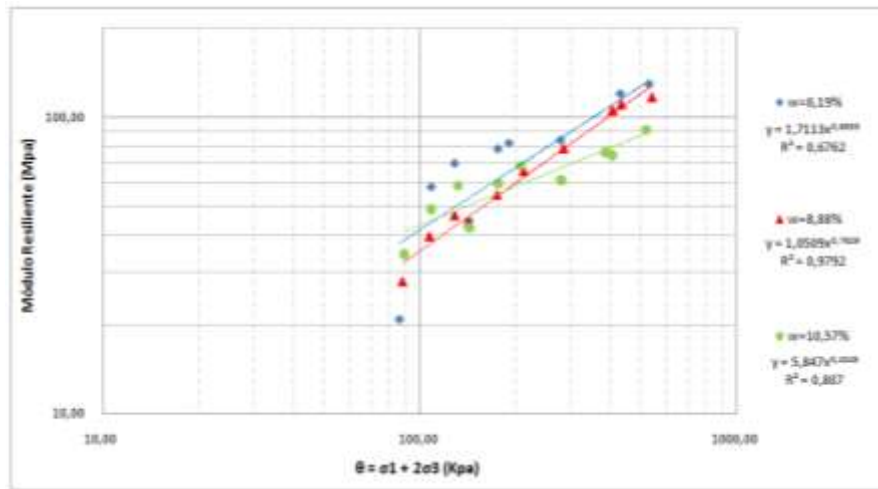
Los resultados de módulo resiliente permiten establecer que a medida que se incrementa la humedad de las probetas, los valores de módulo tienden a disminuir según el estado de esfuerzos al cual fueron sometidos (ver tabla 9 y figura 19). El estado de esfuerzos (denominado invariante de esfuerzos en el ensayo de módulo resiliente) se denota con la letra griega tetha  $\theta$  y es igual a la suma de los esfuerzos principales  $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$ .

**Tabla 9 Valores de módulo obtenidos para la base granular después del ensayo de módulo resiliente.**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
w = 6,19%		w = 8,88%		w = 10,57%	
$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)
86,48	20,85	88,30	28,00	89,53	34,56
108,89	58,39	107,41	39,75	108,49	49,05
129,13	70,12	129,01	46,76	132,21	58,95
143,29	44,83	142,48	44,22	143,62	42,46
176,77	78,47	175,30	54,79	176,88	59,81
191,51	82,10	212,88	65,84	208,80	68,83
278,52	83,97	284,14	78,56	279,49	61,36
383,14	76,36	405,54	105,48	385,63	76,35
429,58	120,36	432,53	110,51	405,02	74,60
529,77	129,90	540,01	116,82	518,65	90,76

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 19 Variación del módulo resiliente para el material de base granular en función del contenido de humedad de la muestra.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Una ecuación de tipo potencial puede expresar los resultados de módulos en función del estado de esfuerzos al que están sometidos (en kPa) y podrá ser empleada para todos los materiales granulares y de subrasante en la presente investigación.

$$Mr (MPa) = \alpha Pa \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^n$$

**Tabla 10** Parámetros que describen los valores de MR en función de  $\theta$  – base granular

W (%)	$\alpha$	n	R <sup>2</sup>
6.19	1.71	0.69	0.68
8.88	1.05	0.76	0.98
10.57	5.85	0.43	0.81

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

## 6.2.2 SUBBASE GRANULAR

### 6.2.2.1 Ensayos de caracterización física básicos

Un resumen de los ensayos de caracterización física básica para el material de subbase granular se presentan en el anexo 13.

### 6.2.2.2 Ensayos de módulo resiliente

Las condiciones de humedad y densidad reales a las cuales se compactaron las probetas de subbase granular se presentan en la tabla 11.

**Tabla 11** Humedades y densidades de las probetas elaboradas en laboratorio para el ensayo de MR sobre el material de subbase granular.

Material	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)
Subbase Granular	1,88	5,58	2,05	8,08	1,93	11,07

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Los resultados del ensayo permiten observar en forma general que los valores de módulo para el material de subbase granular tienden a disminuir a medida que se incrementa la humedad de las probetas compactadas, un comportamiento similar al presentado por el material de base granular (ver tabla 12).

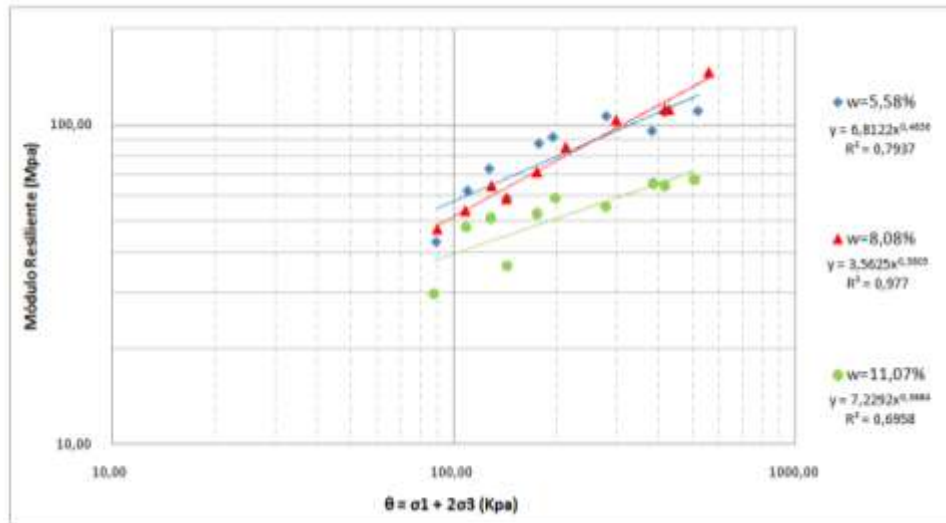
**Tabla 12 Valores de módulo obtenidos para la subbase granular después del ensayo de módulo resiliente.**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
w = 5,58%		w = 8,08%		w = 11,07%	
$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)
89,02	43,13	89,63	47,11	87,68	29,64
109,94	62,42	108,24	53,77	108,74	47,87
127,29	73,15	129,13	64,41	128,29	51,16
143,42	59,03	142,63	58,79	143,07	36,17
177,84	87,66	175,35	71,18	175,24	52,83
195,41	91,81	213,05	85,19	198,56	59,13
280,29	106,89	298,88	103,30	279,23	55,41
381,32	95,96	414,71	111,91	383,59	65,55
415,07	110,12	426,48	111,60	414,60	64,58
520,15	110,88	557,78	146,20	505,66	67,48

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

La representación gráfica del comportamiento resiliente de la subbase granular se presenta en la figura 20.

**Figura 20 Variación del módulo resiliente para el material de subbase granular en función del contenido de humedad de la muestra.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Tabla 13 Parámetros que describen los valores de MR en función de  $\theta$  – subbase granular.**

W (%)	$\alpha$	n	R <sup>2</sup>
5.58	6.81	0.46	0.79
8.08	3.56	0.58	0.98
11.07	7.23	0.37	0.70

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.2.3 MATERIAL GRANULAR TIPO B-600

#### 6.2.3.1 Ensayos de caracterización física básicos

Un resumen de los resultados de caracterización física básica del material granular tipo b600 se encuentran en el anexo 14.

#### 6.2.3.2 Ensayos de módulo resiliente

En la tabla 14 se relacionan los valores de humedad y densidad reales a las cuales se compactaron las probetas de material granular b-600.

**Tabla 14 Densidades y humedades reales de las probetas elaboradas en laboratorio para el ensayo de MR sobre el material granular b-600.**

Material	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)
Granular b-600	2,01	3,64	2,09	6,51	2,05	9,03

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

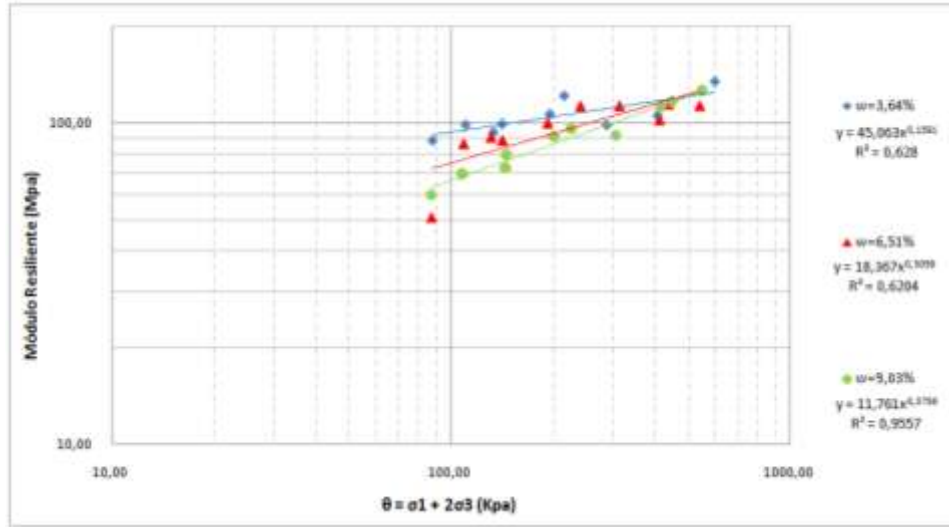
Al igual que los resultados encontrados en los anteriores materiales, el granular b600 presenta una tendencia decreciente en el valor del módulo a medida que se aumenta el contenido de humedad de la probeta (ver tabla 15 y figura 21).

**Tabla 15 Valores de módulo obtenidos para el granular b-600 después del ensayo de módulo resiliente.**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
w = 3,64%		w = 6,51%		w = 9,03%	
$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)
88,11	88,63	87,78	51,07	87,33	59,80
110,30	99,41	109,15	86,67	107,52	69,73
133,11	93,93	131,24	90,82	145,16	79,80
141,22	99,80	141,82	88,89	144,15	72,83
195,12	107,17	192,78	100,49	200,53	91,09
215,34	122,19	240,44	113,72	225,74	96,01
287,24	99,11	312,84	113,76	305,90	91,88
405,44	105,90	410,75	102,91	415,74	112,32
449,65	117,96	436,70	115,06	447,18	116,51
598,80	135,40	539,19	113,92	549,45	126,74

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 21 Variación del módulo resiliente para el material granular b-600 en función del contenido de humedad de la muestra.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Tabla 16 Parámetros que describen los valores de MR en función de  $\theta$  - subrasante b600.**

W (%)	$\alpha$	n	R <sup>2</sup>
3.64	45.60	0.16	0.63
6.51	18.37	0.31	0.62
9.03	11.76	0.38	0.96

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.2.4 SUBRASANTE GRANULAR

La caracterización básica del material de subrasante se adoptó con base en los resultados de los ensayos realizados por la firma Auscultar Ltda. Ensayos e Ingeniería, quienes fueron los responsables del estudio de diseño de la estructura de pavimento construida sobre la Calle 170 en inmediaciones con la Autopista Norte (ver anexo 15).

En dicho estudio se llevaron a cabo dos apiques dentro del área correspondiente a nuestro tramo de prueba, de los cuales, los materiales remanentes encontrados como subrasante arrojando los resultados consignados en la tabla 17.

**Tabla 17 Resumen resultados de ensayos de laboratorio sobre material remanente de subrasante.**

Apique	Clasificación		Límites			W <sub>n</sub> (%)	Gradación (%)			Descripción
	USCS	AASHTO	LL	LP	IP		Gravas	Arenas	Finos	
No 1	GP	A-1-a	0	0	0	5,73	58,4	37,4	4,2	Grava mal gradada; mezclas de grava-arena de poco o ningún fino.
No 2	GM-GC	A-1-a	20,3	14,3	6,0	5,23	57,6	29,2	13,2	Grava limo arcillosa

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.2.4.1 Ensayos de módulo resiliente

Sobre el material de subrasante se realizaron tres ensayos de módulo resiliente a diferentes humedades de compactación, tal como se presenta en el resumen contenido en la tabla 18.

**Tabla 18 Densidades y Humedades reales de las probetas ensayadas en laboratorio para el ensayo de MR sobre el material de subrasante granular.**

Material	Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	w (%)
Subrasante remanente	1.95	5.29	2.05	8.35	1.96	11.53

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

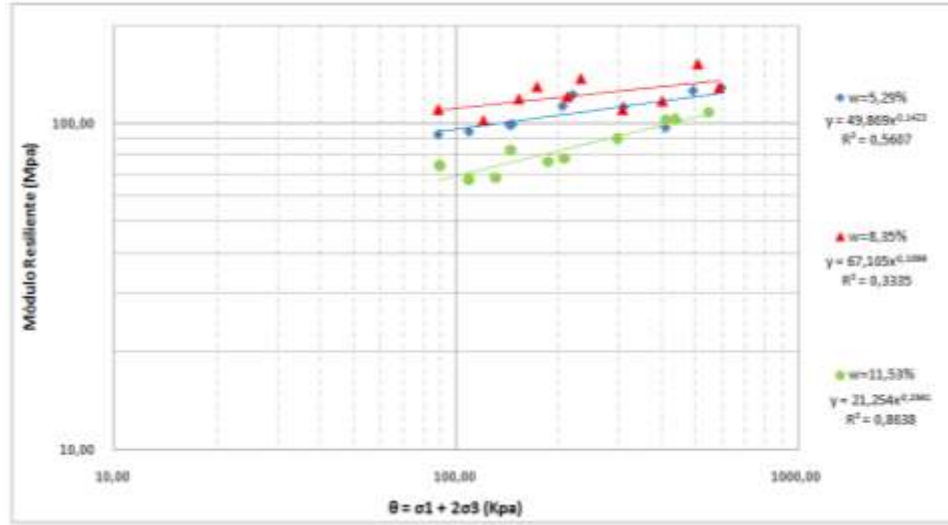
Los resultados obtenidos difieren parcialmente del comportamiento encontrado sobre los materiales granulares, debido a que los mayores valores de módulo se presentaron en la probeta que fue compactada a una humedad óptima. Las dos probetas adicionales obtuvieron valores inferiores, con los resultados más bajos para aquella que fue compactada con el mayor valor de humedad (ver tabla 19 y figura 22).

**Tabla 19 Valores de módulo obtenidos para la subrasante remanente después del ensayo de módulo resiliente.**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
w = 5,29%		w = 8,35%		w = 11,53%	
$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)	$\theta$ (Kpa)	MR (Mpa)
88.70	92.80	88.45	110.53	89.34	74.39
109.11	94.74	119.97	102.04	108.57	67.43
145.78	99.46	172.14	130.02	130.35	68.31
143.59	99.09	152.19	119.23	144.09	83.21
205.24	113.11	211.13	121.06	185.83	76.33
219.47	122.41	231.29	137.79	207.00	78.18
308.53	112.41	306.55	110.41	295.85	89.96
409.78	97.41	400.23	117.40	410.87	102.87
493.06	125.75	508.47	152.91	437.64	103.06
597.28	128.54	587.83	129.00	548.91	108.12

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 22 Variación del módulo resiliente para la subrasante remanente en función del contenido de humedad de la muestra.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Tabla 20 Parámetros que describen los valores de Mr en función de  $\theta$  – subrasante granular remanente.**

W (%)	$\alpha$	n	$R^2$
5.29	49.87	0.14	0.56
8.35	67.11	0.11	0.33
11.53	21.25	0.26	0.86

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.2.5 CARPETA ASFÁLTICA

Este ensayo se desarrolló para cada una de las capas asfálticas instaladas en obra, a tres diferentes frecuencias de carga: 2,5, 5 y 10 hertz, así, como a dos diferentes temperaturas: 15 y 20°C. Los resultados obtenidos del ensayo se relacionan en la tabla 21.

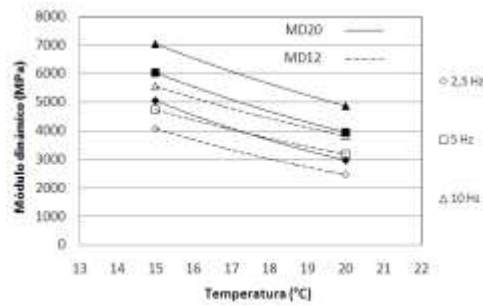
**Tabla 21 Resultados obtenidos después de la ejecución del ensayo de módulo dinámico.**

FRECUENCIA	Mezcla MD12		Mezcla MD20	
	15°C	20°C	15°C	20°C
	Módulo dinámico (MPa)		Módulo dinámico (MPa)	
2,5 Hz	4077	2471	5066	2962
5 Hz	4746	3165	6022	3944
10 Hz	5555	3800	7031	4865

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

La figura 23 relaciona las curvas resultantes del ensayo de módulo dinámico. Las líneas continuas corresponden a los resultados obtenidos sobre la mezcla asfáltica MD20 y las punteadas a los resultados encontrados en la probeta de mezcla asfáltica MD12, observando que la mezcla de menor tamaño de agregado presenta los menores valores de módulo para diferentes frecuencias de carga, notando un decrecimiento del módulo dinámico de forma exponencial para incrementos en la temperatura del ensayo.

**Figura 23 Variación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas en función de la temperatura.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.3 MÓDULOS OBTENIDOS POR MEDIO DE RETROCÁLCULO

Basados en las formulaciones y software descritos en el anexo 7, se presentarán los resultados obtenidos del proceso de retrocálculo de módulos para cada una de las capas que se encuentran instaladas en la estructura de pavimento.

#### 6.3.1 MÓDULOS RETROCALCULADOS EN LA CAPA DE SUBRASANTE.

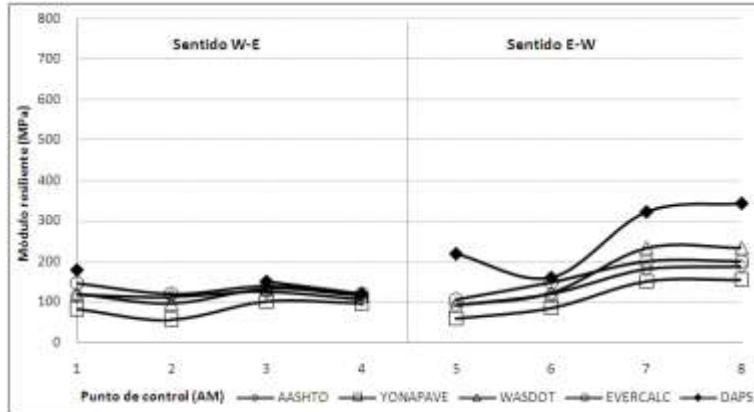
Los resultados de los valores de módulo retrocalculados serán ilustrados sobre cada uno de los puntos de deflexión medidos en el tramo de prueba, para la primera y segunda jornada de ensayos.

**Tabla 22 Módulos retrocalculados de subrasante – Prueba 1.**

Metodología	Puntos de control - Prueba No 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Mpa							
AASHTO	118.1	111.8	125.1	105.2	91.4	121.0	180.4	187.5
YONAPAVE	83.4	55.6	102.0	97.2	59.3	85.3	150.8	154.8
WASDOT	119.3	96.4	132.8	115.4	90.8	121.2	232.2	232.8
EVERCALC	146.8	119.4	137.8	120.9	105.6	149.2	200.0	200.0
DAPS	178.0	29200.0	150.0	119.0	219.0	161.0	323.0	344.0

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Figura 24 Curvas de módulos retrocalculados de subrasante – Prueba 1.



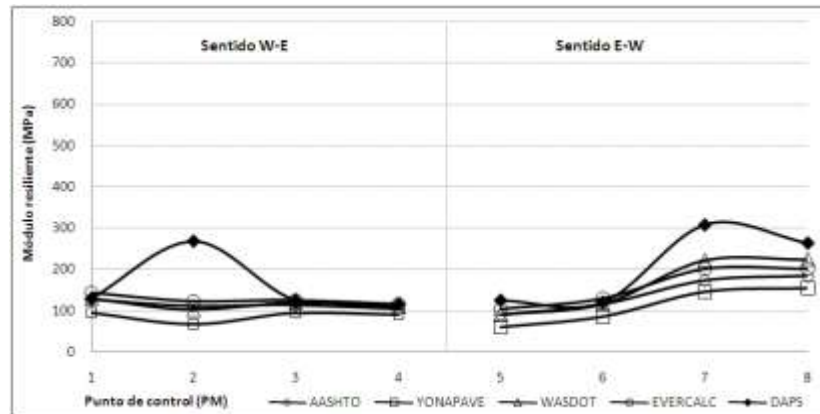
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Tabla 23 Módulos retrocalculados de Subrasante – Prueba 2.

Metodología	Puntos de control - Prueba No 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Mpa							
AASHTO	126.9	110.5	113.5	102.8	89.6	115.6	172.6	183.3
YONAPAVE	93.5	67.3	94.0	89.6	59.7	85.8	145.3	153.9
WASDOT	128.6	102.4	120.4	108.8	89.4	116.5	221.3	223.0
EVERCALC	143.1	122.9	125.5	115.1	103.3	129.5	200.0	200.0
DAPS	129.0	268.0	124.0	115.0	125.0	120.0	308.0	264.0

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Figura 25 Curvas de módulos retrocalculados de subrasante – Prueba 2.



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.3.2 MÓDULOS RETROCALCULADOS EN LA CAPA DE MATERIAL GRANULAR

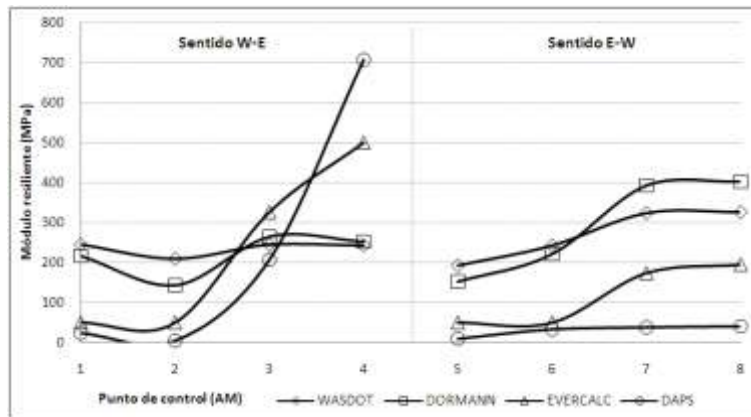
Los resultados de retrocálculo obtenidos para la capa granular se relacionan siguiendo el mismo esquema empleado para la capa de subrasante.

**Tabla 24 Módulos retrocalculados de la capa granular – Prueba 1.**

Metodología	Puntos de control - Prueba No 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Mpa							
WASDOT	246.3	210.5	246.1	244.4	194.4	244.2	325.4	327.9
DORMANN	217.1	144.7	265.6	253.2	154.5	222.2	392.8	403.2
EVERCALC	50.0	50.0	328.3	500.0	50.0	50.0	174.1	195.5
DAPS	24.1	4.8	209.0	709.0	9.7	33.1	38.9	40.5

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 26 Curvas de módulos retrocalculados de la capa granular – Prueba 1.**



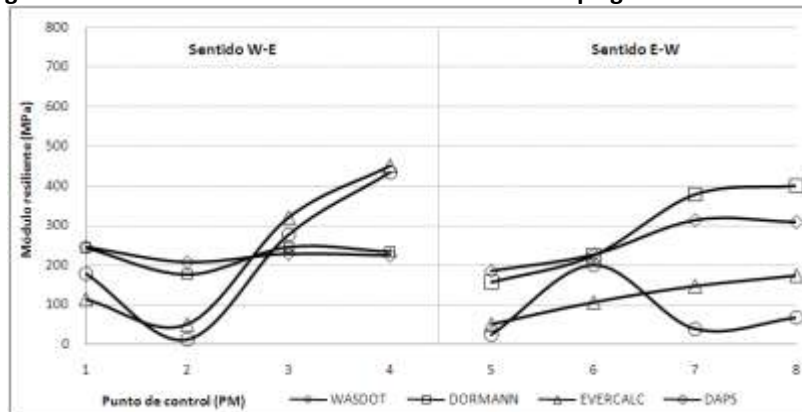
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Tabla 25 Módulos retrocalculados de la capa granular – Prueba 2.**

Metodología	Puntos de control - Prueba No 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Mpa							
WASDOT	246,3	207,7	228,3	224,9	186,4	227,4	313,3	308,2
DORMANN	243,2	175,3	244,7	233,5	155,4	223,4	378,4	400,8
EVERCALC	113,5	50,0	319,3	449,3	50,0	106,8	145,9	173,2
DAPS	177,0	10,7	277,0	433,0	22,6	200,0	38,8	66,6

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 27 Curvas de módulos retrocalculados de la capa granular – Prueba 2.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 6.3.3 MÓDULOS RETROCALCULADOS EN LA CARPETA ASFÁLTICA

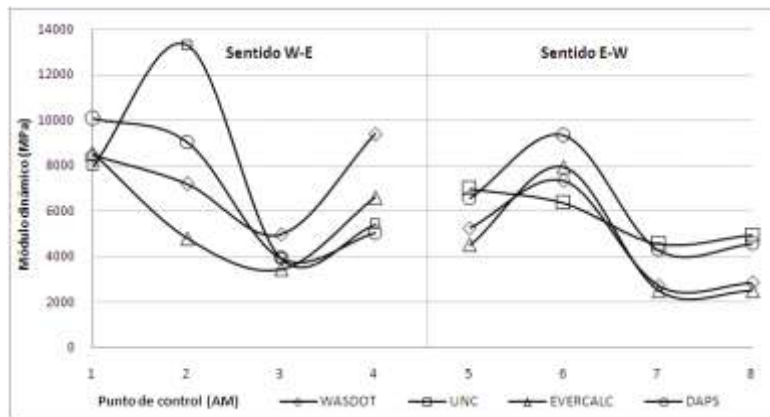
Los resultados de los módulos dinámicos retrocalculados se relacionan mediante el mismo procedimiento realizado para la capa granular y de subrasante.

**Tabla 26 Módulos retrocalculados de la carpeta asfáltica – Prueba 1**

Metodología	Puntos de control - Prueba No 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Mpa							
WASDOT	8465.9	7192.6	4969.0	9382.7	5253.2	7329.3	2724.7	2853.2
UNC	7971.0	13298.3	3932.0	5417.0	6980.7	6345.1	4551.9	4924.7
EVERCALC	8519.0	4796.0	3435.4	6596.9	4516.9	7917.2	2511.3	2485.4
DAPS	10068.0	9029.0	3922.0	5037.0	6547.0	9312.0	4283.0	4561.0

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 28 Curvas de módulos retrocalculados de la carpeta asfáltica – Prueba 1.**



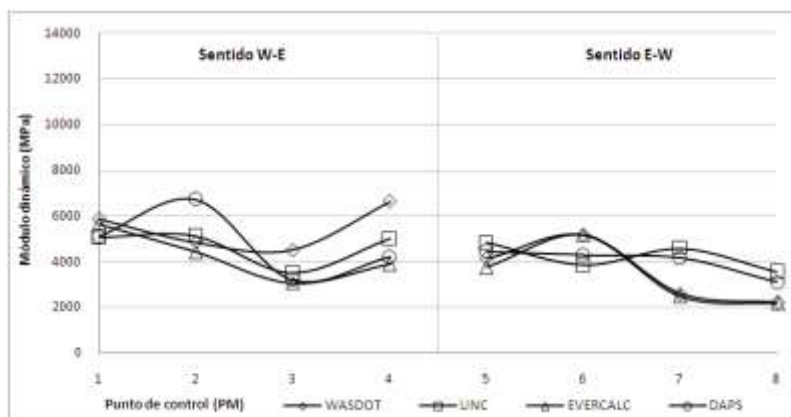
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Tabla 27 Módulos retrocalculados de la carpeta asfáltica – Prueba 2.**

Metodología	Puntos de control - Prueba No 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Mpa							
WASDOT	5854.6	4838.0	4507.9	6622.6	4111.8	5160.1	2576.3	2188.8
UNC	5033.5	5100.2	3486.4	4987.3	4812.3	3834.5	4562.5	3529.9
EVERCALC	5644.0	4405.7	3051.4	3872.2	3747.8	5158.4	2461.9	2153.5
DAPS	5092.0	6715.0	3189.0	4195.0	4438.0	4277.0	4151.0	3080.0

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 29 Curvas de módulos retrocalculados de la carpeta asfáltica – Prueba 2.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo comparar los valores de módulo resiliente obtenidos por medio de ensayos de laboratorio y procedimientos de retrocálculo, razón por la cual, se analizarán los resultados arrojados por cada uno de los métodos previamente mencionados.

### 7.1 DETERMINACIÓN DEL VALOR DE MÓDULO RESILIENTE DE SITIO.

Para poder estimar el valor de módulo resiliente apropiado para cada uno de los materiales instalados dentro del tramo de prueba, es necesario establecer el estado de esfuerzos al cual están sometidos dentro de la estructura de pavimento.

Este estado de esfuerzos comprende la determinación de las componentes verticales y horizontales que actúan en cada capa, considerando el efecto de los esfuerzos geostáticos, más el incremento de esfuerzos por efecto de la carga transmitida por un eje equivalente de 8,2 ton. empleado en el diseño de la estructura de pavimento (ver tabla 28).

**Tabla 28 Estado de esfuerzos calculado para la capa granular y de subrasante en la estructura de pavimento.**

MATERIAL		DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ PROMEDIO (kg/m <sup>3</sup> )	DENSIDAD (kg/cm <sup>3</sup> )	ESPESOR (cm)	ESF. VERTICAL (kg/cm <sup>2</sup> )	ESF. VERTICAL (kpa)	K0	ESF. HORIZ. (kpa)	$\Delta\sigma$ (Kpa)	$\theta$ (Kpa)
CARPETA ASFÁLTICA	MD12	2188	2189	0.002189	6	0.03	2.63	-	-	-	-
	MD20	2189			18						
CAPA GRANULAR	BASE	2076	2051	0.002051	15	0.08	8.33	0.67	5.55	108.00	124.66
	SUBBASE	2025			15						
SUBRASANTE	B-600	1995	2010	0.001995	-	0.11	11.40	0.82	9.33	61.00	88.99
	SUBRASANTE	2024									

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

La Invariante de esfuerzos  $\theta$  obtenida del análisis y presentada en la tabla 28, será el valor de referencia a emplear para calcular el módulo resiliente de la capa granular y de subrasante, según correlación con las líneas de tendencia encontradas de los ensayos de módulo realizados en laboratorio. Las consideraciones realizadas para este cálculo se pueden observar en el anexo 16.

#### 7.1.1 MATERIAL DE SUBRASANTE

Para la selección del módulo resiliente del material de subrasante, así como del material granular b-600, se toma como referencia la tendencia ofrecida por los resultados obtenidos por las probetas compactadas a un porcentaje de humedad igual al 8,35% y 6,51% respectivamente, similares a las humedades de los materiales compactados en campo.

Con base en el resultado del estado de esfuerzos para los materiales empleados como subrasante (ver tabla 28), se pudo estimar los valores de módulo resiliente para el material granular de subrasante y el granular de mejoramiento b-600, tal como se presenta en la tabla 29.

**Tabla 29 Valores de MR calculados para la subrasante granular y el material b-600.**

MATERIAL	MODELO ESF. BULK	REGRESIÓN LABORATORIO (Wopt)	Correlación (R <sup>2</sup> )	θ Campo (kpa)	Mr Calculado (kpa)
Subrasante granular	Mr = K1*θ <sup>k2</sup>	Mr = 67.105*θ <sup>0.1099</sup>	0.33	88.99	109.90
Granular b600		Mr = 18.367*θ <sup>0.3059</sup>	0.62	88.99	72.50

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 7.1.2 MATERIAL GRANULAR

Siguiendo el mismo procedimiento empleado para el material de subrasante, se determinan los valores de módulo resiliente adoptados para los materiales granulares, según se presenta en la tabla 30. La selección de estos valores se adoptó según los resultados de las probetas que se compactaron a la humedad óptima adoptada, las cuales eran de 8,88% para la base y 8,08% para la subbase granular.

**Tabla 30 Valores de MR calculados para los materiales de base y subbase granular.**

MATERIAL	MODELO ESF. BULK	REGRESIÓN LABORATORIO (Wopt)	Correlación (R <sup>2</sup> )	θ Campo (kpa)	Mr Calculado (kpa)
Base granular	Mr = K1*θ <sup>k2</sup>	Mr = 1.051*θ <sup>0.7629</sup>	0.98	124.66	41.72
Subbase granular		Mr = 3.562*θ <sup>0.5805</sup>	0.98	124.66	58.66

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Debido a la que la capa de material granular está formada por materiales de base y subbase granular; se estimó conveniente realizar un análisis independiente para cada uno de ellos al momento de la comparación con el valor obtenido por retrocálculo, de tal manera que se encontrara un rango de variación para el coeficiente de ajuste hallado en la presente investigación.

### 7.1.3 CARPETA ASFÁLTICA

El valor del módulo dinámico estimado para la carpeta asfáltica se asume para condiciones de temperatura de la mezcla igual a 20°C y se determina de los resultados obtenidos de las probetas ensayadas en laboratorio.

En la presente investigación se adoptarán como módulos dinámicos de la capa asfáltica los referidos a una frecuencia de carga igual a 10 Hz, la cual es la que mejor simula un vehículo en movimiento que posea un eje equivalente de diseño a una velocidad promedio de 60 km/hr (ver tabla 31).

**Tabla 31 Valores de módulo dinámico obtenidos para una temperatura de 20°C y una frecuencia de 10 Hz.**

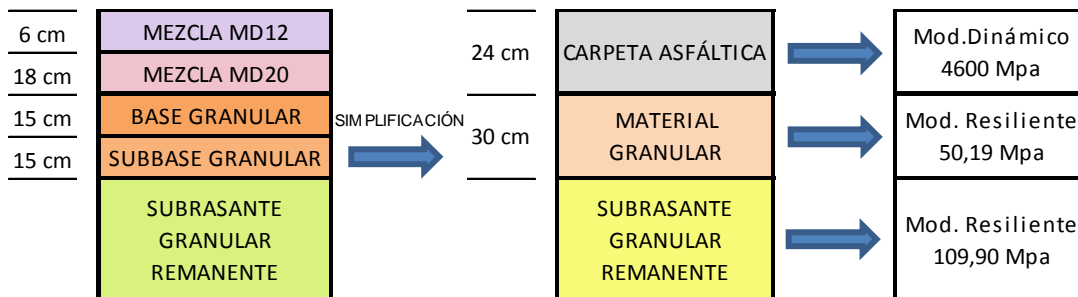
	Mezcla MD12	Mezcla MD20
FRECUENCIA	20°C	20°C
	Módulo dinámico (MPa)	
10 Hz	3800	4865

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

El módulo adoptado para toda la carpeta se realiza por medio de un promedio ponderado en función del espesor de cada tipo de mezcla, dando como resultado un valor de módulo aproximado de 4600 MPa.

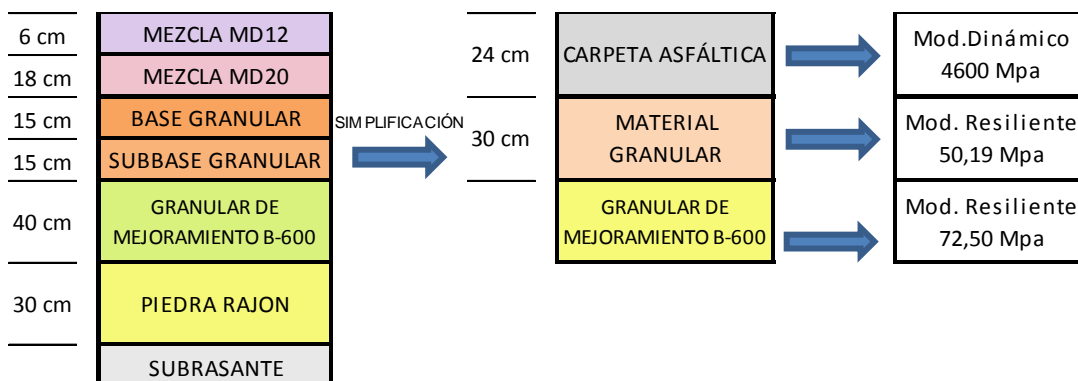
En las figuras 30 Y 31 se ilustra de forma simplificada las dos estructuras de pavimento flexible instaladas a lo largo del tramo de prueba, con el valor de módulo adoptado para cada una de las capas, según las consideraciones descritas previamente.

**Figura 30 Valores de módulo resiliente y dinámico adoptados para la estructura del costado norte.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 31 Valores de módulo resiliente y dinámico adoptados para la estructura del costado sur.**



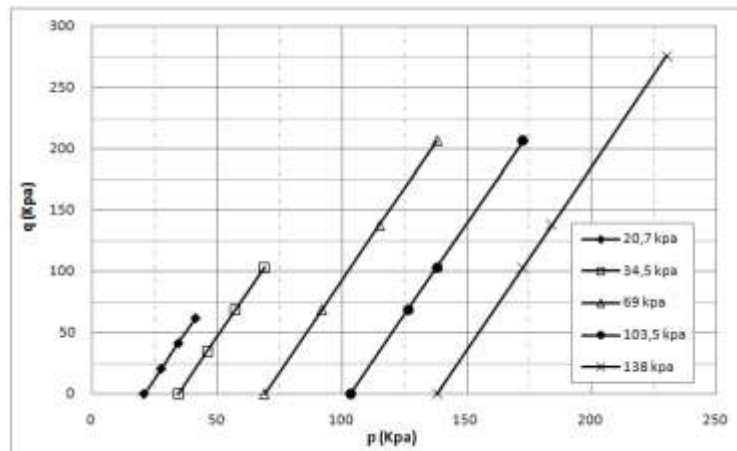
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

## 7.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE OBTENIDOS EN LABORATORIO

El ensayo de módulo resiliente busca simular las condiciones de carga reales a las que se ven sometidos los materiales bajo la acción de las cargas del tránsito, por medio de la aplicación de una serie de diferentes estados de esfuerzos, el cual inicia con un ciclo de carga-descarga de 500 repeticiones bajo un esfuerzo de confinamiento y desviador igual a 103,5 kpa.

Después de esta etapa de acondicionamiento, la muestra es sometida a 15 diferentes trayectorias de esfuerzos que se aplican de forma sucesiva, cada una de ellas con incrementos en su nivel de esfuerzos bajo cinco esfuerzos de confinamiento constantes (ver figura 32). Cada una de las secuencias de carga se aplica durante 100 ciclos, donde en los últimos cinco ciclos se mide la deformación reversible ó resiliente de la muestra.

**Figura 32 Trayectorias de esfuerzos para la determinación de las propiedades resilientes de los materiales granulares.**



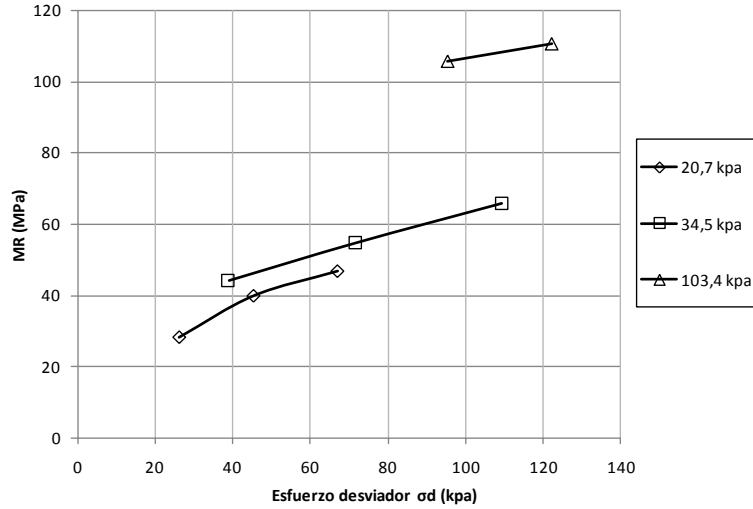
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Debido a las limitaciones del equipo en el cual se desarrollaron los ensayos de módulo resiliente, sólo fue posible ejecutar 10 de las 15 secuencias de carga establecidas para dicho ensayo, debido a que éste no podía realizar secuencias de carga con esfuerzos desviadores superiores a 120 kpa.

### 7.2.1 EFECTO DE LA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y ESTADO DE ESFUERZOS

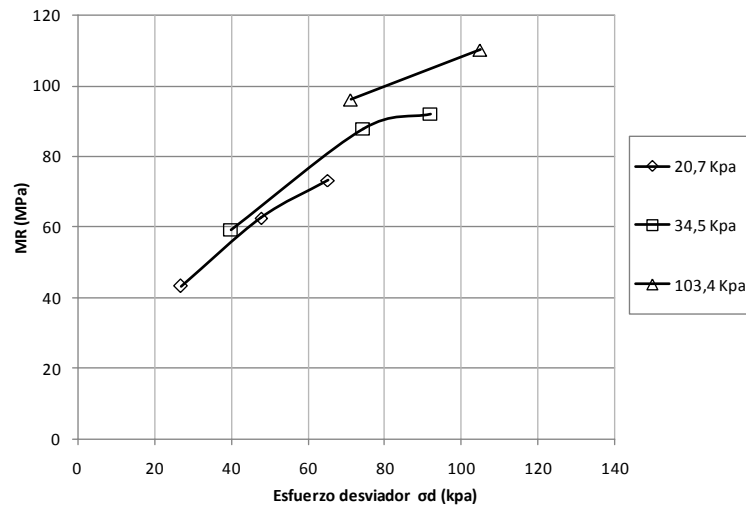
De los resultados de laboratorio obtenidos se puede resaltar que los materiales granulares presentan un incremento en su valor de módulo resiliente a medida que el esfuerzo de confinamiento y el estado de esfuerzos también aumentan; un comportamiento que se repite para diferentes materiales y diferentes humedades de compactación, ya sea que éstas se encuentren por encima o por debajo del valor óptimo de cada material (ver figuras 33 a 35).

**Figura 33 Variación del MR con el incremento del estado de esfuerzos para un material de base granular compactado a Wopt.**



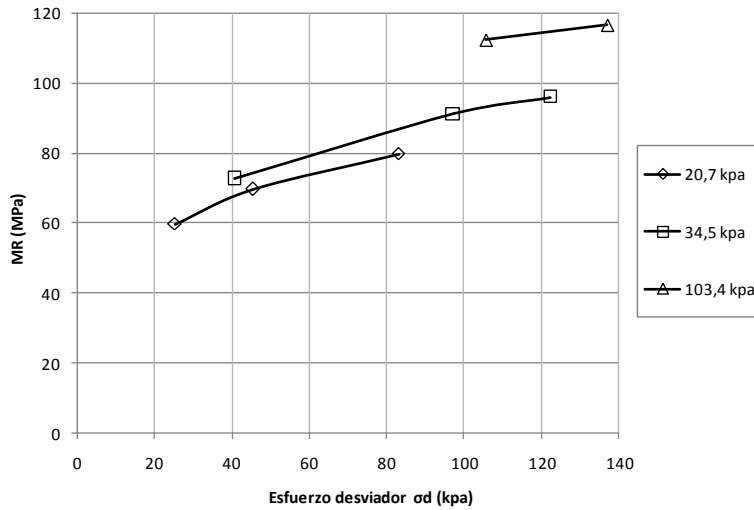
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 34 Variación del MR con el incremento del estado de esfuerzos para un material de subbase granular compactado a Wopt - 2,5%.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

**Figura 35 Variación del MR con el incremento del estado de esfuerzos para un material granular tipo B-600 compactado a  $W_{opt} + 2,5\%$ .**



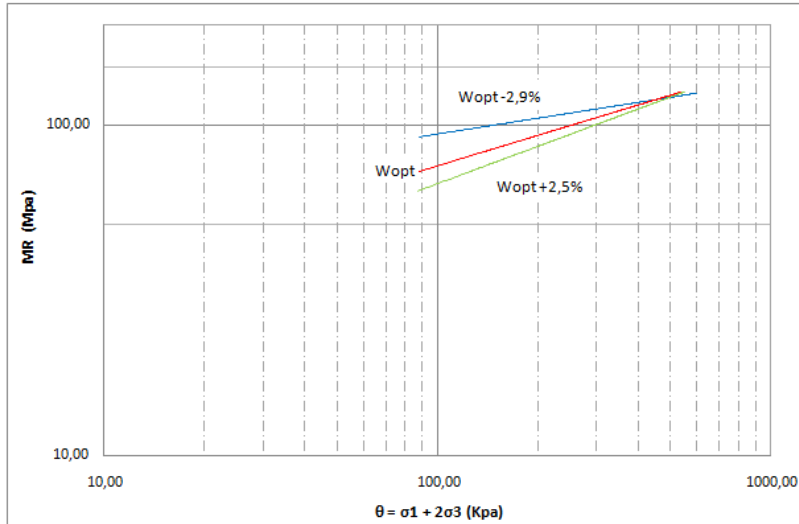
**Fuente: Elaboración Propia, 2010.**

Para el material de subrasante granular, el comportamiento incremental en el valor del módulo resiliente no es tan evidente como para los materiales granulares ya presentados, atribuido principalmente a un mayor contenido de finos, el cual, aunque no domina completamente su comportamiento, si permite observar decrementos en el valor del módulo para algunos estados de esfuerzos.

### 7.2.2 EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA

El contenido de humedad al cual se compactaron las probetas para cada uno de los diferentes materiales también se convierte en un parámetro importante al momento de determinar su respuesta resiliente, debido a que contenidos de agua superiores a la humedad óptima, arrojan valores de módulo inferiores, comparados con los obtenidos para un contenido óptimo de agua; caso opuesto al que se presenta cuando el contenido de agua es menor al óptimo, el cual ofrece como tendencia general mayores valores de módulo, asociado principalmente al incremento de los efectos de la succión al interior del material (ver figura 36).

**Figura 36 Variación del MR para un material granular tipo B-600 para diferentes contenidos de humedad.**

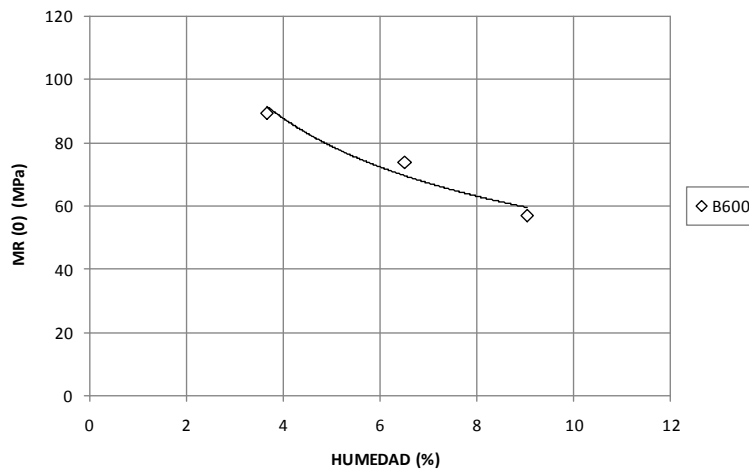


Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Debido a las fuerzas de capilaridad que se presentan al interior de las probetas una vez compactadas, es posible establecer que para una condición en la cual no se ejerza ningún estado de esfuerzos sobre las muestras, éstas poseerán un valor de módulo inicial diferente a cero (Caicedo, Coronado y Fleureau, 2009.), denotado en la presente investigación como MR(0); el cual podrá ser estimado con base en una relación lineal, según la tendencia de los resultados de módulo obtenidos durante los ensayos de laboratorio.

Empleando los resultados obtenidos para el material granular tipo b-600 y al estimar los valores de módulo para una condición de estado de esfuerzos igual a cero, se observa que éstos tienden a aumentar a medida que se disminuye el contenido agua de las probetas (ver figura 37), esto debido al incremento de las fuerzas capilares que se presentan al interior de los partículas que conforman la muestra.

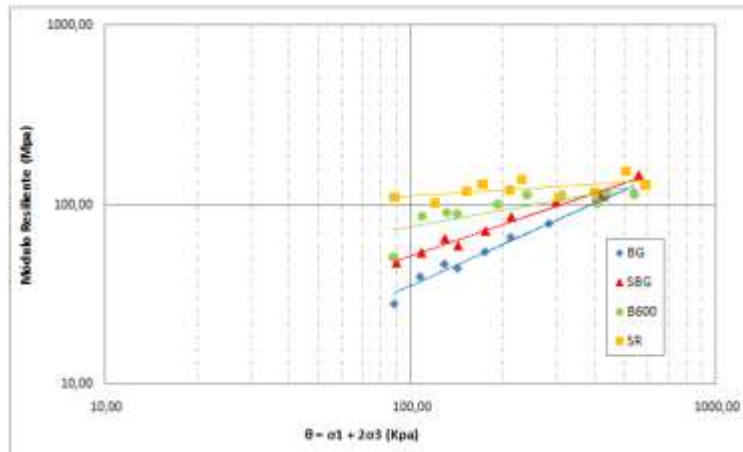
**Figura 37 Variación de MR(0) en función del contenido de humedad para un material granular tipo B-600.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

El comportamiento resiliente de los materiales analizados en la presente investigación, permite observar además que los materiales granulares que presentan un mayor contenido de finos ofrecen para un mismo estado de esfuerzos mayores valores de módulo, comparados con aquellos cuyo porcentaje de finos es inferior; asociando estos resultados de forma directa con un incremento en el valor de la succión presente al interior de cada material (ver figura 38).

**Figura 38 Comparación del MR para los diferentes materiales empleados en la investigación compactados a una Wopt.**



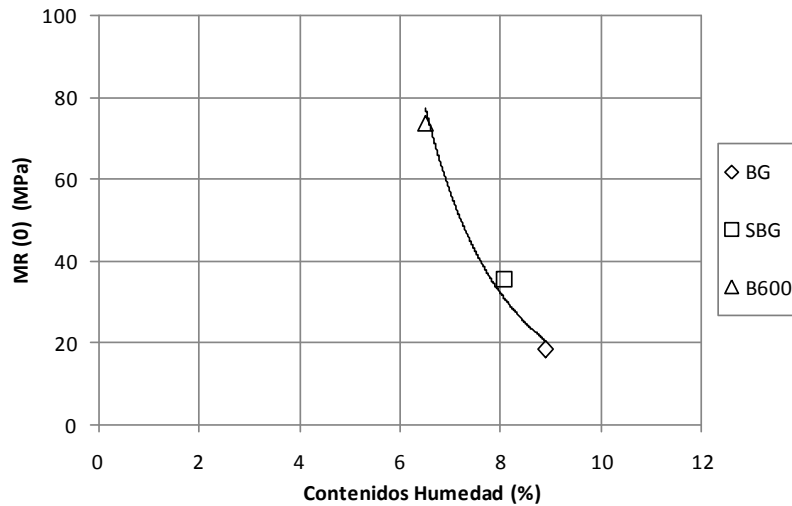
Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Este comportamiento del módulo tiende a cambiar para estados de esfuerzos cercanos o superiores a 400 kpa, donde los efectos de la fuerza matricial al interior de los materiales se reduce debido al cierre de los vacíos interpartícula de la muestra.

No sólo para muestras ensayadas con un mismo material se puede apreciar la importancia del contenido de agua en el valor del módulo inicial  $MR(0)$ ; el análisis realizado sobre los materiales granulares de base, subbase y b-600 que son usados comúnmente para la conformación de estructuras de pavimento también valida este comportamiento.

Con base en los resultados de módulo presentados en la figura 38, se estimó el valor del módulo inicial  $MR(0)$  para los materiales granulares antes mencionados, de tal forma que fueran comparados a la luz del contenido de humedad presente al momento de su compactación (ver figura 39).

**Figura 39 Variación de MR(0) según el contenido de humedad para diferentes materiales granulares.**



**Fuente: Elaboración Propia, 2010.**

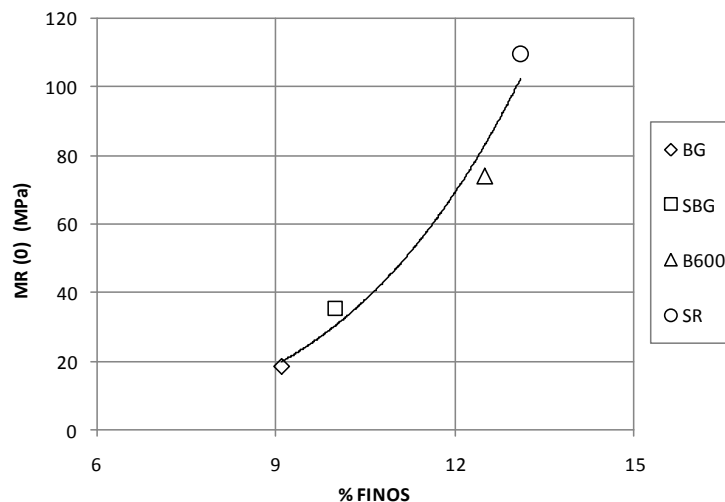
El resultado obtenido permite apreciar nuevamente una disminución en el valor del módulo MR(0) para muestras que fueron compactadas a un valor de humedad óptimo mayor, lo que conduce a la interpretación que las menores cantidades de agua al interior de la muestra incrementa los efectos de la succión matricial, y esta a su vez influye directamente en el valor final del módulo.

### 7.2.3 EFECTO DEL CONTENIDO DE FINOS Y EL INDICE DE PLASTICIDAD

En algunas investigaciones desarrolladas por Thom y Brown (1987) y Kamal y otros (1993), se reportó que el valor del Módulo resiliente posee una tendencia decreciente a medida que se incrementa el porcentaje de finos; caso opuesto a lo encontrado por Caicedo, Coronado y Fleureau (2009), quienes encontraron que para muestras con iguales contenidos de agua, el efecto del contenido de finos estaba directamente relacionado con el incremento del valor del módulo para un condición de estado de esfuerzos igual a cero.

En la presente investigación se encontró que las muestras ensayadas en laboratorio para humedades de compactación óptimas relativamente cercanas entre sí (BG=8,88%, SBG=8,08%, B600=6,51% y SR=8,35%), arrojaron un decremento en el valor del MR(0) para Índices de plasticidad más bajos (ver figura 40); un comportamiento generalmente asociado a la presión de poros negativa presente en la muestra, relacionado en forma directa con el contenido de finos del material.

**Figura 40 Influencia del Contenido de Finos en el valor del MR(0).**



**Fuente: Elaboración Propia, 2010.**

Debido a la limitante en la cantidad de ensayos ejecutados y a la imposibilidad de poder controlar de forma estricta el contenido de humedad, los resultados obtenidos aunque se acercan a las de otras investigaciones no permiten confirmar la dependencia directa del MR(0) con el índice de plasticidad, un comportamiento que difiere de otros estudios realizados al respecto.

### **7.3 CONSIDERACION PARA LA ESTIMACIÓN DE UN FACTOR DE AJUSTE QUE PERMITA COMPARAR LOS MÓDULOS RESILIENTES OBTENIDOS EN LABORATORIO CON LOS ENCONTRADOS DE LA APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS DE RETROCÁLCULO**

La guía de diseño AASHTO-93, ha incluido producto de sus investigaciones algunos procedimientos para la determinación del módulo resiliente de la subrasante usando procesos de retrocálculo, para los cuales ha recomendado afectar estos resultados por un factor de ajuste; debido a que de forma general estos módulos son superiores a aquellos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Esta tendencia se debe, a que en este procedimiento de retrocálculo se estima el módulo resiliente con base en mediciones de deflexión alejadas del eje de aplicación de la carga, por lo que los esfuerzos generados son inferiores a los obtenidos justo debajo de la zona de impacto, arrojando valores de módulo superiores.

Estas metodologías se han masificado debido a la celeridad de estos procedimientos para la determinación de módulos, comparado con la ejecución de ensayos de laboratorio; aunque debe hacerse claridad que las condiciones de campo en las cuales se encuentran los materiales difieren en humedad, peso unitario seco, condiciones de confinamiento, métodos de compactación, distribución y tamaño de partículas, entre otros, con las condiciones de las muestras reconstituidas en laboratorio; por lo que estas técnicas indirectas para el cálculo de módulos ofrecerán diferencias con las mediciones directas de esfuerzos y deformaciones medidas en la cámara triaxial.

Al estimar el módulo resiliente, con base en los resultados de laboratorio, éste debe responder a un estado de esfuerzos que represente la condición existente en campo, de tal forma que éstos puedan ser comparados con los obtenidos por los procedimientos de retrocálculo.

Este coeficiente de ajuste, aunque representa un acercamiento entre los valores retrocalculados con los de laboratorio, debe ser escogido bajo un criterio adecuado ya que las condiciones de humedad de los materiales existentes en campo, puede influir directamente en subdiseños ó sobrediseños de las estructuras de pavimento estudiadas.

## **7.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS HALLADOS POR RETROCÁLCULO Y LOS OBTENIDOS A PARTIR DE ENSAYOS DE LABORATORIO**

Para llevar a cabo la comparación de los módulos obtenidos por retrocálculo y laboratorio es importante tener presente las siguientes consideraciones:

Para el análisis del material de subrasante se hará una diferenciación entre el material granular remanente encontrado en el tramo del costado norte, con el tramo del costado sur, debido a que en este último el 75% del material que se encuentra instalado fue mejorado con un material granular tipo b-600.

Para el caso de los materiales granulares de base y subbase, se tendrán en cuenta todos los valores obtenidos por retrocálculo en los dos tramos de prueba, tanto para la jornada de la mañana como de la tarde, de tal forma que se pueda estimar si existe alguna diferencia entre los factores de ajuste obtenidos para cada una de estas dos condiciones.

Por último, el análisis a realizar sobre los resultados obtenidos en la carpeta asfáltica se hará de forma similar al desarrollado sobre los materiales granulares, es decir, se tomarán en cuenta todos los valores retrocalculados en los 8 puntos de prueba, con una diferenciación entre la jornada de la mañana y de la tarde; esto con el fin de determinar si existe alguna variación en los coeficientes de ajuste, debido a la dependencia que esta carpeta posee frente a los efectos de la temperatura.

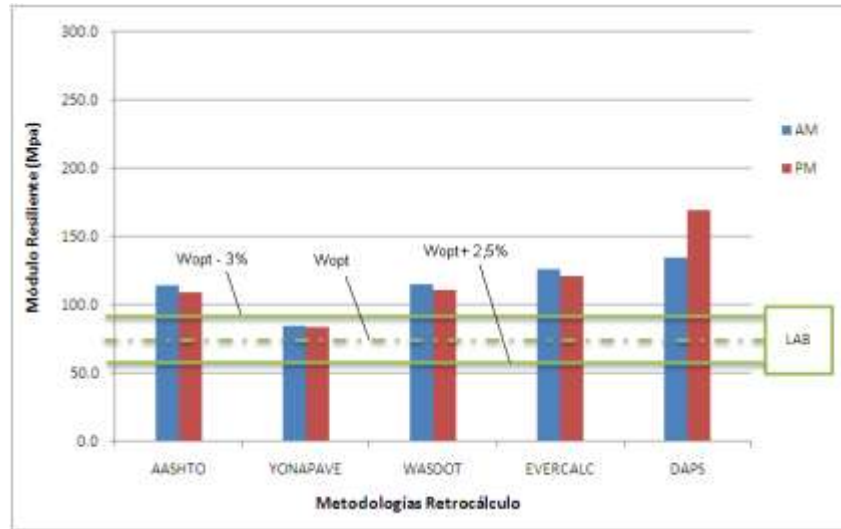
### **7.4.1 CAPA DE SUBRASANTE**

#### **7.4.1.1 *Material granular de mejoramiento tipo b-600.***

Para el tramo de prueba del costado sur, donde se ejecutaron las pruebas de deflectometría 1 a 4, los resultados de módulo resiliente obtenidos sobre el material de mejoramiento b-600 serán comparados con los obtenidos por las diferentes metodologías de retrocálculo.

En la figura 41 se compilan los resultados de módulo retrocalculados según los cuencos de deflexión medidos en horas de la mañana y de la tarde, así como los resultados obtenidos en laboratorio para los diferentes contenidos de humedad a las cuales fueron ensayadas las probetas.

**Figura 41 Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para el material granular tipo b-600.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Se observa que los valores de módulo retrocalculados por cualquier metodología empleada no difieren significativamente en sus resultados para cuencos de deflexión medidos en horas de la mañana o de la tarde; lo que expresa una independencia entre éstos y la temperatura ambiente a la que fueron realizadas las pruebas de deflectometría.

Estas diferencias de módulo oscilan en un rango de 1.5 a 4.5%, con excepción del software DAPS, el cual arrojó una diferencia muy marcada cercana al 25%.

Para efectos prácticos se adoptará un valor retrocalculado promedio para cada metodología, la cual permitirá estimar unos coeficientes de ajuste (K), que relacionarían el módulo resiliente de laboratorio (MRL), para diferentes contenidos de humedad, con el valor del módulo resiliente retrocalculado (MRR) (ver tabla 32).

Esta relación se basa en que los resultados de laboratorio representan una medida directa de las propiedades resilientes de los materiales, a la luz de mediciones indirectas de módulo ofrecidas a partir de datos de deflectometría.

**Tabla 32 Factores de ajuste (k) encontrados para el material de subrasante granular tipo b-600.**

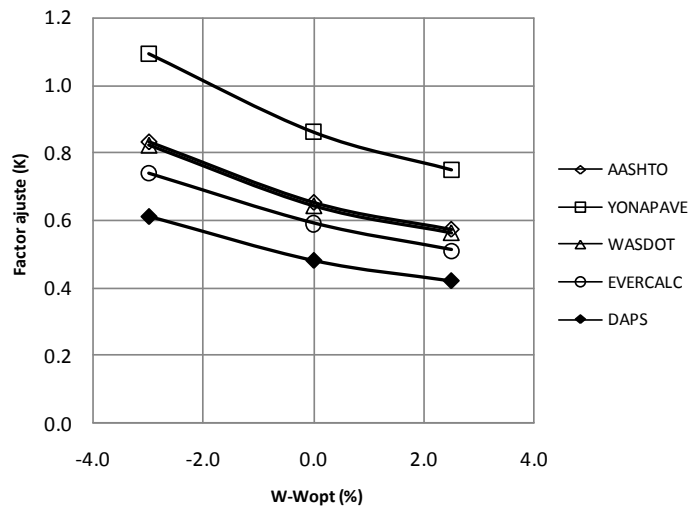
Metodología	RANGO DEL FACTOR DE AJUSTE (K=MRL/MRR)		
	Wopt - 3%	Wopt	Wopt + 2.5%
AASHTO	0.83	0.65	0.57
YONAPAVE	1.09	0.86	0.75
WASDOT	0.82	0.64	0.56
EVERCALC	0.74	0.59	0.51
DAPS	0.61	0.48	0.42

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Los coeficientes de ajuste obtenidos arrojaron aproximaciones cercanas a 1.0 para las muestras que fueron compactadas en laboratorio con un 3% por debajo de la humedad óptima; ofreciendo un comportamiento opuesto para aquellas probetas compactadas con humedades por encima del valor óptimo.

La grafica 42 permite apreciar una relación inversa entre el contenido de humedad del material y el factor de ajuste, encontrando que un contenido de humedad por encima del valor óptimo permite obtener coeficientes más bajos, debido a la disminución en el valor del módulo encontrado en laboratorio.

**Figura 42 Relación entre la humedad y el factor de ajuste k – subrasante granular tipo b600.**



**Fuente: Elaboración Propia, 2010.**

A la luz de los resultados presentados, la metodología Yonapave fue la que obtuvo los factores de ajuste más altos, contrastado con los dos software empleados, EVERCALC y DAPS, los cuales arrojaron un coeficiente de ajuste más bajos.

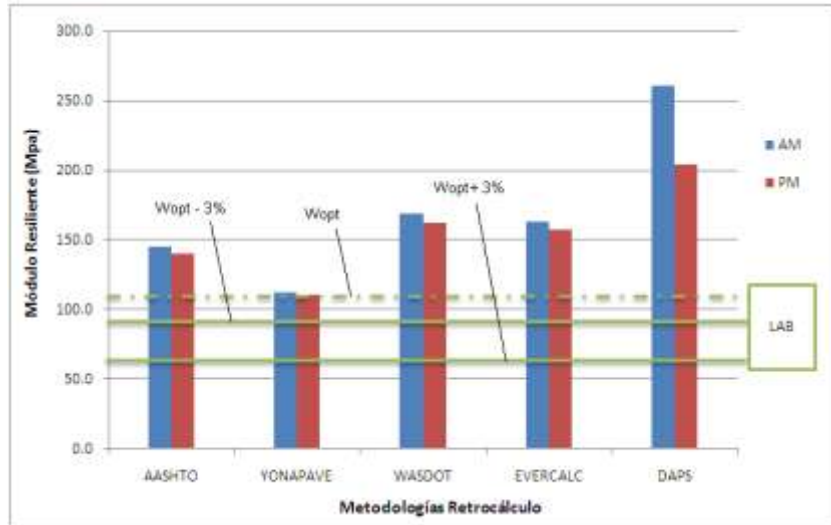
Si se utilizara el coeficiente de 0,33 que sugiere la metodología AASHTO para determinar el módulo resiliente de la subrasante, el cual es independiente del tipo de suelo existente en sitio, y se comparara con el factor de 0,65 encontrado en esta investigación, se estaría subvalorando el módulo resiliente de la capa analizada para efectos de diseño o rehabilitación de una estructura, lo que podría inducir mayores costos en futuras obras.

#### **7.4.1.2 Subrasante granular remanente.**

Al agrupar todos los valores de módulo retrocalculados basados en las deflexiones medidas al costado norte del tramo de prueba y compararlos con los valores del módulo resiliente de laboratorio, se observa que las variaciones para cuencos de deflexión medidos en ambas jornadas de prueba no influye en gran medida en los resultados obtenidos dentro de cada metodología, evidenciando la independencia de estos resultados con la temperatura ambiente a la cual se tomaron las deflexiones (ver figura 43).

Las diferencias entre los valores retrocalculados dentro de cada metodología se encuentran entre el 1.2 y 4.0%, encontrando las mayores contrastes para el software DAPS, el cual ofreció un valor cercano al 22%.

**Figura 43 Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para el material de subrasante granular remanente.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Los factores de ajuste (K) determinados para cada metodología se estimaron según la relación existente entre los módulos retrocalculados y los módulos de laboratorio, estos últimos para diferentes contenidos de humedad del material de fundación, una variable que influencia los coeficientes obtenidos (ver tabla 33).

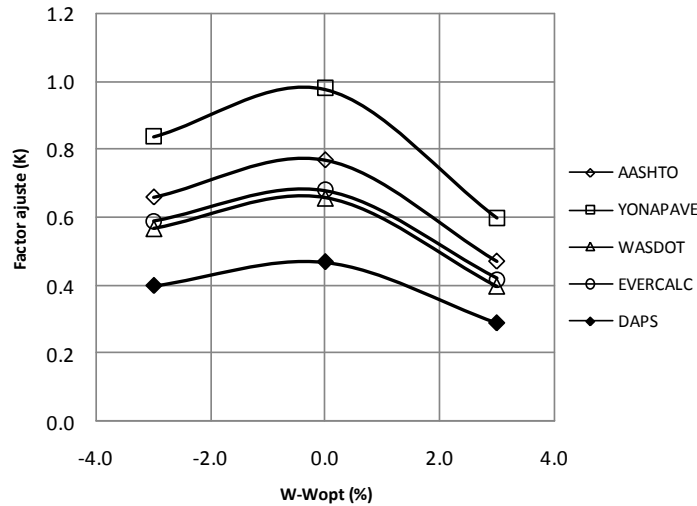
**Tabla 33 Factores de ajuste (k) encontrados para el material de subrasante granular remanente.**

Metodología	RANGO DEL FACTOR DE AJUSTE (K=MRL/MRR)		
	Wopt - 3%	Wopt	Wopt + 3%
AASHTO	0.66	0.77	0.47
YONAPAVE	0.84	0.98	0.60
WASDOT	0.57	0.66	0.40
EVERCALC	0.59	0.68	0.42
DAPS	0.40	0.47	0.29

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Para el caso del material granular remanente, las mejores aproximaciones con base en el coeficiente de ajuste se presentaron para las muestras compactadas a una humedad óptima y las más alejadas se encontraron para las probetas con contenidos de humedad superiores a la óptima.

**Figura 44 Relación entre la humedad y el factor de ajuste k – subrasante granular remanente.**



**Fuente: Elaboración Propia, 2010.**

En la figura 44 se observa una relación decreciente del factor de ajuste a medida que aumenta la humedad de la muestra por encima del valor óptimo, una condición similar a la presentada para el material granular b-600; aunque se debe mencionar que este comportamiento no es claro para un contenido de agua menor al óptimo, donde factores como la distribución de las partículas al interior de la muestra, el peso unitario del material ó la homogeneidad en el contenido de agua al interior de la probeta pudieron haber influido en los ensayos realizados en laboratorio, y por consiguiente en el factor de ajuste obtenido.

Al igual que para el material granular b600, en la subrasante granular remanente los mayores coeficientes se encontraron con la utilización de la metodología Yonapave. En contraste, el software DAPS sigue presentado los coeficientes más bajos, debido a los mayores valores de módulos retrocalculados.

Para este material, según la metodología AASHTO, el coeficiente encontrado fue de 0,77, un valor superior al propuesto por dicha guía de diseño, lo que reduce en gran medida la afectación del módulo retrocalculado para efectos de diseño.

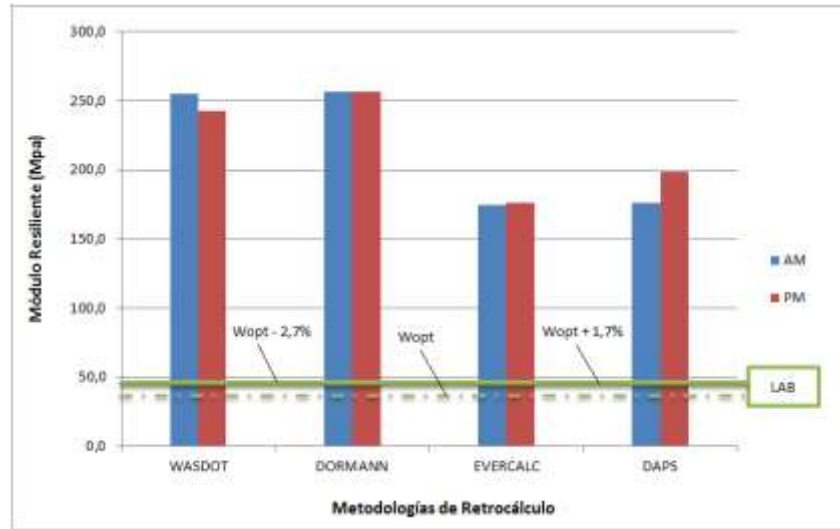
#### **7.4.2 CAPA GRANULAR**

Debido a que la capa granular sobre la cual se emplearon las metodologías de retrocálculo se encontraba conformada por dos diferentes materiales, base y subbase granular, cada una de ellas con un espesor igual a 15 cm, se analizarán los resultados de forma independiente para observar su relación frente a los valores de laboratorio obtenidos.

##### **7.4.2.1 Material de Base Granular**

Los valores de módulo retrocalculados que se observan en la figura 45, fueron comparados con los obtenidos de los ensayos de laboratorio para diferentes contenidos de humedad.

**Figura 45 Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para un material de base granular.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Los valores de módulo obtenidos por retrocálculo se encuentran dentro de un rango aceptable para este tipo de materiales, comparados con los resultados hallados en laboratorio, los cuales se sitúan en un rango inferior; otorgando unas diferencias entre ambos módulos por encima del 75%. Esta situación, hace que los factores de ajuste (k) obtenidos para la base granular hayan sido muy bajos, comparados con los materiales empleados en la subrasante (ver tabla34).

**Tabla 34 Factores de ajuste (k) encontrados para el material de base granular.**

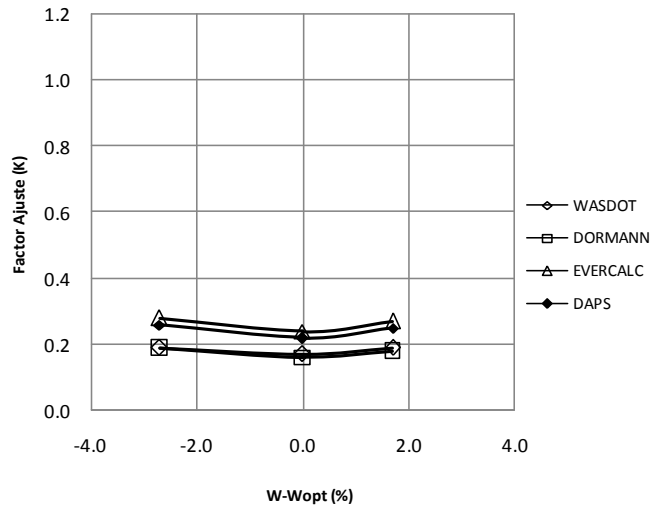
Metodología	RANGO DEL FACTOR DE AJUSTE (K=MRL/MRR)		
	Wopt - 2,7%	Wopt	Wopt + 1,7%
WASDOT	0.19	0.17	0.19
DORMANN	0.19	0.16	0.18
EVERCALC	0.28	0.24	0.27
DAPS	0.26	0.22	0.25

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Para este material se destaca la similitud entre los resultados obtenidos por retrocálculo con base en cuencos de deflexión medios en ambas jornadas de prueba, lo que define una independencia entre éstos y la temperatura de la carpeta al momento de la prueba deflectométrica.

Las diferencias entre resultados para cada metodología se encuentran entre 0,1 y un 4,7%, con excepción de la metodología DAPS, la cual arrojó un valor del 13,1%.

**Figura 46 Relación entre la humedad y el factor de ajuste k – base granular.**



**Fuente: Elaboración Propia, 2010.**

Con los coeficientes hallados se puede observar un comportamiento similar al obtenido en la subrasante de material b-600, en donde a menores contenidos de humedad el factor de ajuste tiende a ser mayor, comparado con el contenido óptimo de agua; para este material, con diferencias que oscilan entre en 2 y 4% (ver figura 46).

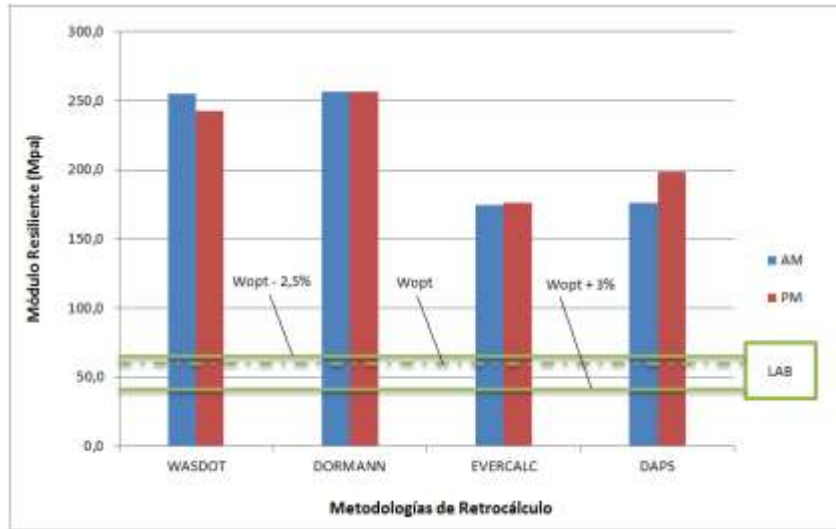
Este comportamiento no es tan evidente del lado húmedo de la muestra posiblemente asociados a la baja diferencia de humedades, si se compara con contenidos de agua cercanos al 3% presentes en los materiales anteriormente analizados, o a la disposición de las partículas al interior de la muestra al momento de su compactación.

#### **7.4.2.2 Material de Subbase Granular.**

Al igual que en la base, en la subbase granular los valores de módulo obtenidos en laboratorio fueron muy bajos, comparados con los retrocalculados (ver figura 47).

Este material es ajeno a la variación de la temperatura de la carpeta asfáltica, razón por la cual los resultados retrocalculados son muy similares con independencia de la jornada de prueba a la cual se haya medido el cuenco de deflexión.

**Figura 47 Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para un material de subbase granular.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

El comportamiento de este material frente a los resultados de los factores de ajuste (k) indica un incremento de este último con el decrecimiento de la humedad del material (ver tabla 35).

**Tabla 35 Factores de ajuste (k) encontrados para el material de subbase granular.**

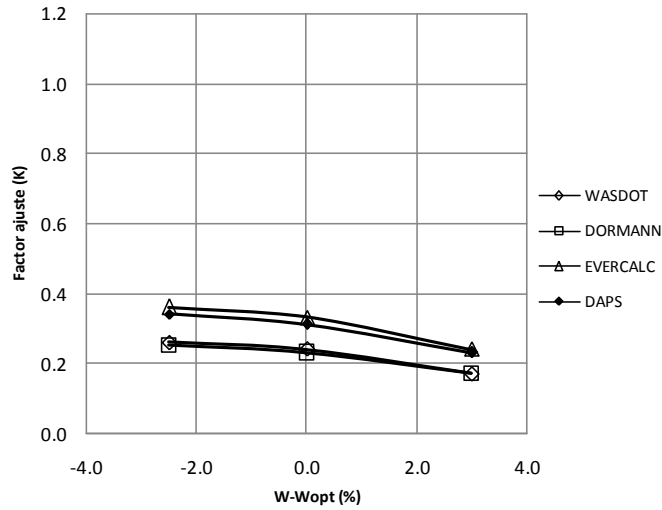
Metodología	RANGO DEL FACTOR DE AJUSTE (K=MRL/MRR)		
	Wopt - 2,5%	Wopt	Wopt + 3%
WASDOT	0.26	0.24	0.17
DORMANN	0.25	0.23	0.17
EVERCALC	0.36	0.33	0.24
DAPS	0.34	0.31	0.23

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Estos coeficientes comparados con los hallados para la base granular son mayores entre un 2 y un 9%, esto como consecuencia del incremento en el valor del módulo resiliente obtenido en laboratorio para este material.

Al observar la figura 48, se aprecia una relación inversamente proporcional entre el factor de ajuste y el contenido de agua de la muestra, la cual se ha venido presentando en los análisis anteriores, con mayor o menor claridad en algunos de ellos; reflejando una tendencia general asociada a este tipo de material granulares.

**Figura 48 Relación entre la humedad y el factor de ajuste k – subbase granular.**

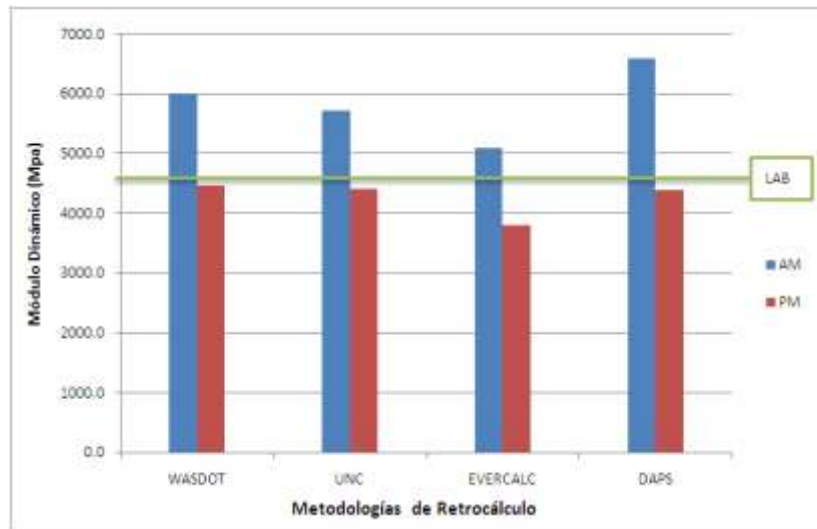


Fuente: Elaboración Propia, 2010.

### 7.4.3 CARPETA ASFÁLTICA

Los módulos retrocalculados según cuencos de deflexión medidos en cada jornada de prueba, arrojaron para cada metodología diferencias estimadas entre un 30 y 50% (ver figura 49).

**Figura 49 Resultados de módulo dinámico obtenidos por retrocálculo y laboratorio para la carpeta asfáltica.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Debido a estas diferencias se decidió estimar para la misma carpeta dos diferentes coeficientes de ajuste, los cuales se relacionan en la tabla 36.

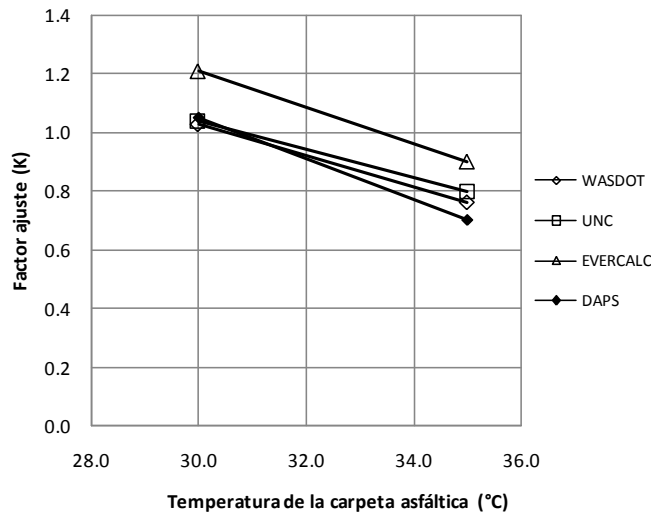
**Tabla 36 Factores de ajuste (k) encontrados para la carpeta asfáltica.**

Metodología	RANGO DEL FACTOR DE AJUSTE (K=MDL/MDR)	
	Temp. CA = 35°C	Temp. CA = 30°C
WASDOT	0.76	1.03
UNC	0.80	1.04
EVERCALC	0.90	1.21
DAPS	0.70	1.05

Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Según estos resultados los coeficientes de ajuste obtenidos están relacionados con los factores de corrección adoptados por efectos de temperatura, ya que menores factores, arrojan menores deflexiones y a su vez mayores módulos retrocalculados, dando por consiguiente coeficientes de ajuste inferiores a 1,0.

**Figura 50 Relación entre el factor de ajuste (k) y la temperatura de la carpeta asfáltica.**



Fuente: Elaboración Propia, 2010.

Se debe destacar que a pesar de estar corregidas las deflexiones por efectos de temperatura (lo que eliminaría esta influencia dentro del análisis), las diferencias entre los factores de ajuste para las dos jornadas de prueba son evidentes (ver figura 50); lo que permite estimar que deflexiones medidas a temperaturas cercanas a los 20°C obtendrían factores de ajuste iguales o muy cercanos a 1,0. Esto como consecuencia que las metodologías de retrocálculo y los ensayos dinámicos en laboratorio convergen en este parámetro para la determinación del módulo.

El ensayar un núcleo de pavimento extraído directamente de sitio permite representar en laboratorio de forma directa las condiciones del material instalado en obra, lo que hace posible que la determinación del módulo por ambos métodos arroje resultados similares, tal como se observa en los factores de ajuste encontrados.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se consignan las principales conclusiones obtenidas de la investigación discriminadas en función de algunos aspectos relevantes para destacar:

### 1. RELACIÓN DE MÓDULOS RETROCALCULADOS Y DE LABORATORIO

- ✓ Las metodologías de retrocálculo empleadas permitieron observar en términos generales que los valores de módulos obtenidos para materiales granulares no se ven influenciados por la temperatura de la carpeta asfáltica al momento de la deflectometría.
- ✓ La determinación de una coeficientes de ajuste (k), para materiales granulares, permite enmarcar la susceptibilidad de éste ante los contenidos de humedad de los materiales en sitio; por lo que se recomienda sean empleados de forma cuidadosa, ya que ellos pueden inducir a subdiseños o sobrediseños de las estructuras de pavimento estudiadas.
- ✓ Se corroboró con base en investigaciones similares sobre el tema, que los valores de módulo retrocalculados generalmente otorgan mayores resultados que los obtenidos a partir de ensayos en laboratorio, asociado a los materiales granulares como de subrasante.
- ✓ Los factores de ajuste encontrados en la presente investigación, ofrecen una aproximación para determinar el módulo resiliente de diseño para capas de subrasante y granulares, cuando los materiales analizados sean similares a las características físicas de los materiales aquí presentados y cuando se empleen algunas de las metodologías aquí utilizadas.
- ✓ En términos generales el factor de ajuste encontrado para materiales granulares y de subrasante se incrementa, cuando el contenido de agua presente en el material se encuentra por debajo del contenido de humedad óptima.
- ✓ Los resultados de retrocálculo para el módulo dinámico fueron susceptibles a la temperatura ambiente, encontrando que los coeficientes de ajuste (k) determinados en horas de la mañana, fueron inferiores a los obtenidos en horas de la tarde.

### 2. RESULTADOS DE MÓDULO RESILIENTE Y MÓDULO DINÁMICO

- ✓ De los ensayos de módulo realizados en laboratorio, el contenido de agua al interior de las muestras influye inversamente en los resultados obtenidos, debido a que mayores contenidos de humedad reducen la magnitud del módulo y viceversa.
- ✓ Los resultados de módulo obtenidos sobre los materiales de base, subbase y b-600, compactados a la humedad óptima de cada material, arrojaron un mayor valor del módulo resiliente inicial MR(0) en aquellos materiales que poseían un mayor contenido de finos; un comportamiento que se puede asociar al incremento de los valores de succión interpartícula al interior de las muestras.

- ✓ En laboratorio se vio reflejado que los materiales granulares incrementan su módulo resiliente a medida que el esfuerzo de confinamiento y el estado de esfuerzos también aumentan; un comportamiento generalmente independiente de la humedad de compactación de las probetas.
- ✓ El módulo obtenido en laboratorio estuvo influenciado por el porcentaje de finos de cada material; encontrando un incremento para los materiales con un mayor contenido empleados como subrasante, para humedades óptimas de compactación, asociados al incremento en el valor de la succión presente en cada muestra.
- ✓ Una de las posibles causas para que los resultados de módulo obtenidos en laboratorio arrojaran valores muy bajos, se debe a que las deformaciones medidas durante el ensayo se tomaron al exterior de la cámara triaxial, lo que brinda deformaciones generalmente más grandes a las que pueden ser medidas por captos adheridos a la muestra al interior de la cámara; por el contrario, en el ensayo de módulo dinámico donde las deformaciones se miden directamente sobre la probeta, los resultados son más cercanos a los valores determinados por metodologías de retrocálculo.
- ✓ Los ensayos de módulo dinámico permitieron observar la tendencia decreciente en el valor del módulo cuando se incrementaba la temperatura del ensayo y cuando la frecuencia de carga dinámica aplicada a los núcleos disminuía.

### **3. MEDICIÓN Y CORRECCIÓN DE DEFLEXIONES**

- ✓ Aunque no es una condición acentuada, las deflexiones medidas en horas de la tarde arrojaron mayores valores comparadas con las del medio día, una tendencia opuesta al comportamiento existente en la literatura de referencia, en variaciones que oscilan entre un 2 y un 11% para la deflexión máxima (D0).
- ✓ Es posible que una diferencia mayor a 5°C en la temperatura de la capa asfáltica entre una prueba y otra (en cuencos corregidos sólo por carga), permita evidenciar que las mayores deflexiones se presentan a altas temperaturas, tal como lo relaciona la literatura.
- ✓ Corregir por efectos de temperatura sólo la deflexión máxima (D0), sin tener en cuenta la deflexión de los demás geófonos a que haya lugar, puede ocasionar que las metodologías de retrocálculo provean resultados excesivamente alejados de los rangos probables ó imposibilidades en la determinación del valor del módulo deseado.

### **4. RECOMENDACIONES PARA EL USO DE METODOLOGÍAS DE RETROCALCULO**

- ✓ Si se requiere emplear alguna de las metodologías para el determinar el módulo resiliente de la subrasante, se recomienda usar la metodología Yonapave con el uso del factor de ajuste obtenido, debido a que ella ofreció las mejores aproximaciones entre los valores de laboratorio y retrocalculados.
- ✓ Para determinar el módulo de la capa granular se recomienda emplear la metodología WASDOT, la cual aunque no ofrece factores de ajuste elevados, si se encuentra dentro del rango promedio obtenido por las demás metodologías. Los software DAPS y EVERCALC

pueden ser empleados con el factor de ajuste propuesto, resaltando que el éxito de estos métodos radica en los parámetros iniciales que se ingrese al sistema para realizar el proceso de retrocálculo.

- ✓ Para determinar el módulo dinámico, se recomienda emplear la formulación WASDOT con datos de cuencos de deflexión medidos a temperaturas de carpeta asfáltica cercanas a 20°C; aunque cualquiera de las metodologías presentadas arrojaron coeficientes de ajuste cercanos a 1,0.

## **5. RECOMENDACIONES PARA PRÓXIMAS INVESTIGACIONES**

- ✓ Para próximas investigaciones se recomienda analizar la variación de los cuencos de deflexión en épocas diferentes del año, donde se pueda observar la influencia de los efectos climáticos en los materiales instalados dentro de la estructura de un pavimento.
- ✓ Debido a que los datos obtenidos no permitieron confirmar o descartar la influencia del peso unitario seco en la variación de los coeficientes de ajuste, se recomienda tener presente este parámetro para próximas investigaciones.
- ✓ Los materiales de base y subbase no otorgaron grandes coeficientes de ajuste debido a los bajos valores de módulo obtenidos en laboratorio, razón por la cual se recomienda realizar un estudio similar para materiales procedentes de diferentes fuentes, de tal forma que se puedan validar o reevaluar los coeficientes encontrados.
- ✓ Se recomienda llevar a cabo ensayos de módulo resiliente con tamaño de muestra de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de tal forma que el tamaño del agregado al interior de las probetas sea similar al de los materiales instalados en campo; una condición que no pudo ser reproducida en laboratorio.
- ✓ Determinar un coeficiente de ajuste ( $k$ ) que sea específico para los suelos finos de la ciudad de Bogotá y que permita determinar el módulo de diseño de la capa subrasante para procesos de diseño empleando la metodología de AASHTO.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

AASHTO T 307 (Modified). Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. En: Washington State Department of Transportation. Materials manual M 46-01. Estados Unidos de America: WASDOT, 03 January 2009. 1 p.

ABATECH CONSULTING ENGINEERS. Deflection Analysis of Pavement Structures (DAPS). Estados Unidos de America: Abatech Consulting Engineers, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide for design of pavement structures. Estados Unidos de América: AASHTO ,1993.

AMERI, M.; YAVARI, N. y SCULLION, T. Comparison of static and dynamic backcalculation of flexible pavement layers moduli using four software programs. Asian Journal of Applied Sciences 2, 2009. 197-210 p.

AUSCULTAR LTDA. DISEÑO DE PAVIMENTOS. Rehabilitación de los tramos rojos de las vías de la malla vial arterial principal y complementaria correspondiente al grupo V – avenida calle 170. Bogotá: Unión temporal construcciones viales, febrero 2009.

AUSTIN, A. Fundamental characterization of unbound base course materials under cyclic loading. Estados Unidos de América, mayo 2002. Tesis de grado (Maestría). Louisiana Tech University.

BARRERO, J. y PERDOMO, A. Correlaciones entre el módulo de elasticidad obtenido mediante el Falling Weight Deflectometer (FWD), la Relación de Soporte de California (CBR) y el Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP) en suelos finos de Bogotá D.C. Bogotá,2001. Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana.

BERESFORD, O. y ARNOLD, D. A model for the prediction of subgrade soil resilient modulus for flexible-pavement design: influence of moisture content and climate change. Estados Unidos de America: December 2004. Tesis de grado.

CAICEDO, B.; CORONADO, O. y FLEUREAU, J. Resilient behaviour of non standard unbound granular materials. Francia: Road materials and pavements design (vol 10; No 2), 2009. 287-312 p.

CAIXIA, W. y XIANGSHEN, H. Correction problem of pavement evaluation with FWD deflection.

CEYLAN, H. et al. Nondestructive evaluation of Iowa pavements: Phase I. Estados Unidos de America: Iowa Department of Transportation, December 2007.

CHITRAPU, S.; HOSSAIN, M. y ROMANOSCHI, S. Consideration of stress sensitivity in backcalculation of subgrade moduli. Estados Unidos de America: Kansas State University, 21-25 October 2002.

CHRISTOPHER, B.; SCHWARTZ, C. y BOUDREAU, R. Geotechnical aspects of pavements. Estados Unidos de America: Federal Highway Administration (FHWA-NHI-05-037), May 2006.

COLOMBO HISPÁNICA LTDA. Ejecución de obras de la malla vial, arterial, intermedia y local – grupo 1 – localidades de Suba y Usaquén etapa previa. Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano IDU, 2009.

CORONADO, O. Etude du comportement mécanique de matériaux granulaires compactés non saturés sous chargements cycliques. Paris: 2005. Tesis Doctoral. L'école Centrale de Paris.

CORONADO, O. et al. Influence de la succion sur les propriétés de matériaux granulaires routiers. En: 57 CONGRES CANADIEN DE GÉOTECHNIQUE (5 Congres conjoint AIH-CNC/SCG). Québec: 2004.

CORONADO, O. et al. Influence of suction on the properties of two granular road materials.

CRESPO, R. y RUIZ, F. Evaluación estructural de firmes de carreteras, el área del cuenco de deflexiones - el módulo de la explanada. Bogotá: AEPO S.A. ingenieros consultores, Noviembre 2001.

CRESPO, R. y RUIZ, F. Interpretación de las deflexiones obtenidas con deflectómetros de impacto (FWD) para la conservación de firmes de carreteras. En: VIII JORNADAS NACIONALES SOBRE CONSERVACIÓN DE CARRETERAS. Vitoria – Gasteiz, 18 - 21 Junio 2002.

DAEHYEON, K. y JONG RYEOL, K. Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test. En: SCIENCE DIRECT. Construction and Building Materials (21. 2007). 2006. 1470-1479 p.

DAEHYEON, KIM. y NAYYAR, SIDDIKI. Simplification of resilient modulus testing for subgrades. En: Joint Transportation Research Program. Indiana: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, feb 2006.

DEL AGUILA, P. Metodología YONAPAVE para la evaluación estructural de pavimentos flexibles con deflexiones FWD. En: HOFFMAN, Mario S. Presentación 82<sup>ND</sup> annual meeting of TRB. Washington DC, January 2003.

DONG, M. y HAYHOE, G. Analysis of Falling Weight Deflectometer FWD tests at Denver international airport. Estados Unidos de America: Federal Aviation Administration Airport, May 2002.

EVERSERIES USER'S GUIDE. Pavement analysis computer software and case studies. Washington : State Department of Transportation, August 2005.

FLEUREAU, J.; CORONADO, O. y GOMES, A. Prise en compte de la non-saturation dans le dimensionnement des couches des chaussées. Paris, 2004.

FROST, M.; FLEMING, P. y ROGERS, C. Cyclic triaxial on clay subgrades for analytical pavement design. Paris: Journal of Transportation Engineering ASCE, May - June 2004.

FUENTES L., C. et al. Uso del deflectómetro de impacto FWD en la prospección de suelos.

GAETE, R.; FUENTES, C. y VALVERDE, S. Uso del deflectómetro de impacto para la evaluación estructural de recapados asfálticos sobre pavimentos de hormigón.

GARCÍA, C. et al. Análisis del comportamiento del módulo resiliente con respecto a la variación del contenido de humedad para un material de subbase granular tipo SBG-1 del área de Bogotá. En: CENTRO DE EDUCACIÓN CONTINUA UNIVERSIDAD EAFIT. XVII Simposio colombiano sobre ingeniería de pavimentos. Medellín.

GARNICA, P. et al. Módulos de resiliencia de agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas. En: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Publicación Técnica No 256. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2004.

GARNICA, P.; GOMEZ, J. y SESMA, J. Mecánica de materiales para pavimentos. En: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Publicación Técnica No 197. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2002.

GARNICA, P.; PEREZ N. y GOMEZ, J. Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. En: INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Publicación Técnica No 142. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2001.

GEORGE, K. Falling Weight Deflectometer for estimating subgrade resilient moduli. Mississippi: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, october 2003. University of Mississippi. Department of Civil Engineering.

GROGAN, W.; FREEMAN, R. y ALEXANDER, D. Impact of FWD testing variability on pavement evaluations. Paris: Journal of Transportation Engineering, sep - oct 1998.

GUCUNSKI, N.; VITILLO, N. y ZAGHLOUL, S. Development of FWD procedures manual. Estados Unidos de America: Federal Highway Administration (FHWA-NJ-005), 2009.

HANI, TITI; MOHAMMED, ELIAS y HELWANY, SAM. Determination of typical resilient modulus values for selected soils in Winsconsin. Winsconsin: Wisconsin Highway Research Program, mayo 2006. University of Wisconsin – Milwaukee. Department of Civil Engineering and Mechanics.

HOPKINS, TOMMY C. et al. Resilient modulus of Kentucky soils. Kentucky: University of Kentucky, College of Engineering, June 2001.

IDU - INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Anexo técnico para distritos de conservación. Bogotá: Dirección Técnica de Planeación, Grupo de Investigación y Desarrollo, Agosto 2008.

INVIAS - INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. Bogotá: INVIAS, Segunda edición, 2008.

KANCHERLA, A. Resilient Modulus and permanent deformation testing of unbound granular materials. Texas, August 2004. Tesis. Texas A&M University.

KWASI, A. Validation of FWD testing results at the Virginia smart road: theoretically and by instrument responses. Virginia, January 24 2003. Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

LIMAYMANTA MENDOZA, F. M. y GUTIERREZ LÁZARES, W. Ensayo de módulo resiliente. En: XIV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL. Ingeniería del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingenieros del Perú. Iquitos, 2003.

LONG, RICHARD y DELGADO, MARIA G. Resilient modulus of subgrades. Connecticut: University of Connecticut and the Connecticut Department of Transportation. (JHR 91-199, project 88-1).

LÓPEZ, D. Variabilidad del módulo resiliente de una mezcla asfáltica MDC-2 dentro de la ventana de diseño propuesta por Witczak. Manizales, Junio 2008. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

MARTINEZ, J. y PEÑA, L. Estudio de la obtención del módulo resiliente de la subrasante en pavimentos flexibles a partir de la medición de deflexiones. Bogota, 2003. Tesis. Pontificia Universidad Javeriana.

MASADA, T.; SARGAND, SHAD M. y LIAO, Y. Resilient modulus prediction model for fine-grained soils in Ohio: preliminary study. Ohio, 7 april 2006.

MEHTA, Y. y ROQUE, R. Evaluation of FWD data for determination of layer moduli of pavements. Estado Unidos de America: Journal of materials in civil engineering, jan - feb 2003.

MIKHAIL, M. et al. Evaluation of laboratory and backcalculated resilient moduli from the WestTrack Experiment. Estados Unidos de América: Transportation Research Record 1687, año. (Paper 99-1451)

MISHRA, D. y TUTUMLUER, E. Resilient characterization of compacted aggregate. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, oct 17 2007.

MOHAMMAD, L. et al. Comparative evaluation of subgrade resilient modulus from non-destructive, in-situ, and laboratory methods. Louisiana: transportation research center LTRC, august 2007. (Project No 03-3P).

PÉREZ, A. et al. Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos. México: Instituto Mexicano del Transporte, publicación técnica No 252, 2004.

PETERSON ACEVEDO, M. et al. Relación entre módulo resiliente determinado mediante deflectómetro de impacto y el de laboratorio.

PICOUX, B.; EL AYADI, A. y PETIT, C. Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading. EN: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29. Estados Unidos de America: 2009. p 845-854.

PING, V.; YANG, Z. y GAO, Z. Field and laboratory determination of granular subgrade moduli. Journal of performance of constructed facilities, november 2002.

POLOGRUTO, M. Study of in situ pavement material properties determined from FWD testing. Journal of transportation engineering ASCE, september 2006.

RICHARDSON, DAVID y LUSHER, STEVEN. Resilient moduli of granular base materials using a modified type 5 gradation. Missouri: Department of Transportation, January 2009.

RONDON, H. Comportamiento de materiales granulares en pavimentos flexibles. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, dirección general de investigaciones.

SALGADO, M.; MARTINEZ, J. y PEÑA, L. Posibles factores de incidencia en el valor de las mediciones de deflexión de un pavimento. Santiago de Chile.

SANDEFUR, K. Correlation of resilient modulus of fine-grained soils with common soil parameters for use in design of flexible pavements. December 2003. Thesis. University of Hawaii.

SCHMALZER, P. Long-term pavement performance program manual for Falling Weight Deflectometer measurements Version 4.1. Estados Unidos de America: Federal Highway Administration (FHWA- HRT-06-132), Dec 2006.

SEO, J. et al. Evaluation of layer properties of flexible pavement using analysis procedure of Falling Weight Deflectometer. En: SCIENCE DIRECT. Construction and Building Materials 23. 2009. P 3206-3212.

SHALABY, A.; LISKE, T. y KAVUSSI, A. Comparing back-calculated and laboratory resilient moduli of bituminous paving mixtures. NRC Canada. Can. J. Civ. Eng. Vol. 31: 998-996 (2004).

SHARMA, S., DAS, A. Backcalculation of pavement layer moduli from falling deflectometer data using an artificial neural network. Canada: NRC Canada, 2008. P 57-66. (Can. J. Civ. Eng. Vol. 35).

SMITH, H. y JONES, C. Measurement of pavement deflections in tropical and sub-tropical climates. Transport and Road Research Laboratory, 1980. (TRRL Laboratory Report 935).

STOLLE, D. y GUO, P. A practical approach to falling-weight deflectometer (FWD) data reduction. Canada: NRC Canada, 2005. P 641-645. (Can. Geotech. J. Vol. 42).

STUBSTAD, R. et al. Review of the long-term pavement performance backcalculation results – final report. Federal Highway Administration, Feb 2006. (FHWA-HRT-05-150).

STUBSTAD, R.; JIANG, Y. y LUKANEN, E. Guidelines for review and evaluation of backcalculation results. Federal Highway Administration, Feb 2006. (FHWA-HRT-05-152).

STUBSTAD, R.; LUKANEN, E. y CLEVESON, L. Study of long-term pavement performance (LTPP): pavement deflections. Federal Highway Administration, Aug 2006. (FHWA-RD-03-093).

TITI, H. Evaluation of resilient modulus from basic soil properties. Wisconsin: Department of Transportation and University of Wisconsin-Milwaukee, Oct 2007.

TURKIYYAH, G. Feasibility of backcalculation procedures based on dynamic FWD response data; project report. Washington :University of Washington.

TUTUMLUER, E. Testing of unbound aggregates and subgrade soils at the University of Illinois. Illinois: University of Illinois.

VELÁSQUEZ, L. Análisis elástico de la deflexión de equipos de medición dinámica FWD en la auscultación de pavimentos flexibles. Popayán: Universidad del Cauca, oct 2008.

VELÁSQUEZ, L. Retrocálculo de módulos de elasticidad en pavimentos flexibles mediante deflexiones FWD. Medellín: Universidad de Medellín.

VERMONT AGENCY OF TRANSPORTATION. A study of In situ pavement material properties determined from FWD testing. Pavement Design Committee, dec 2004. (RSCH008-936).

VIDAL, J. y OSORIO, R. Módulo resiliente de suelos finogranulares. Medellín: Universidad Eafit, enero-marzo 2002. P 63-71. (número 125).

WITCZAK, M. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. National Cooperative Highway Research Program. January 2004. (Research Results Digest, Number 285).

YOHANNES, B.; HILL, K. y KHAZANOVICH, L. Mechanistic modeling of unbound granular materials. Minnesota: Department of Transportation y University of Minnesota - Department of Civil Engineering, June 2009.

ZAGHLOUL, S. et al. Falling Weight Deflectometer vs laboratory determined resilient modulus (Slab curling study). NJDOT, December 2005. (Research Project Manager).

ZHANG, Z. et al. Evaluation of the pavement structural condition at network level using Falling Weight Deflectometer (FWD) data. Transportation Research Record Series y 82<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. SECUENCIAS DE CARGA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE

### Secuencia de carga para materiales granulares tipo 1.

Secuencia No.	Esfuerzo de Confinamiento		Esfuerzo Desviador		Repeticiones ó Ciclos de carga.
	$\sigma_3$ (Psi)	$\sigma_3$ (Kpa)	$\sigma_d$ (Psi)	$\sigma_d$ (Kpa)	
0*	15	103,5	15	103,5	500 a 1000
1	3	20,7	3	20,7	100
2	3	20,7	6	41,4	100
3	3	20,7	9	62,1	100
4	5	34,5	5	34,5	100
5	5	34,5	10	69,0	100
6	5	34,5	15	103,5	100
7	10	69,0	10	69,0	100
8	10	69,0	20	138,0	100
9	10	69,0	30	207,0	100
10	15	103,5	10	69,0	100
11	15	103,5	15	103,5	100
12	15	103,5	30	207,0	100
13	20	138,0	15	103,5	100
14	20	138,0	20	138,0	100
15	20	138,0	40	276,0	100

\* Etapa de Acondicionamiento de la muestra

FUENTE: Austin, 2002.

### Secuencia de carga para materiales granulares tipo 2.

Secuencia No.	Esfuerzo de Confinamiento		Esfuerzo Desviador		Repeticiones ó Ciclos de carga.
	$\sigma_3$ (Psi)	$\sigma_3$ (Kpa)	$\sigma_d$ (Psi)	$\sigma_d$ (Kpa)	
0*	6	41,4	4	27,6	500 a 1000
1	6	41,4	2	13,8	100
2	6	41,4	4	27,6	100
3	6	41,4	6	41,4	100
4	6	41,4	8	55,2	100
5	6	41,4	10	69,0	100
6	4	27,6	2	13,8	100
7	4	27,6	4	27,6	100
8	4	27,6	6	41,4	100
9	4	27,6	8	55,2	100
10	4	27,6	10	69,0	100
11	2	13,8	2	13,8	100
12	2	13,8	4	27,6	100
13	2	13,8	6	41,4	100
14	2	13,8	8	55,2	100
15	2	13,8	10	69,0	100

\* Etapa de Acondicionamiento de la muestra

FUENTE: Sandefur, 2003.

## ANEXO 2. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL FWD

### GENERALIDADES

La Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, actualmente posee bajo responsabilidad del Laboratorio de Suelos y Rocas, adscrito al Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, un equipo de deflectometría de impacto (ó FWD por sus siglas en inglés) de última tecnología, el cual fue adquirido a la firma JILS, reconocida a nivel mundial por su experiencia en el diseño y construcción de este tipo de dispositivos.

**Figura 1. Equipo FWD JILS-20 de propiedad de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.**



**FUENTE: UNAL Bogotá, 2010.**

El equipo FWD JILS-20 se encuentra instalado sobre un tráiler de doble eje, el cual soporta todo el sistema de aplicación de carga, compuesto por un motor de gasolina que permite operar el sistema hidráulico encargado de controlar el levantamiento y caída del conjunto de masas destinadas a la aplicación del impacto sobre la superficie del pavimento.

Para que el FWD pueda ser empleado en ensayos de campo debe ser remolcado por una camioneta, un camión o un vehículo similar, que tenga acondicionado en su parte posterior un sistema de unión tipo bola, que permita mantener en forma horizontal el tráiler durante su movilización, así como durante la etapa de ejecución de las pruebas de deflectometría, de tal forma que se puedan minimizar posibles errores en la toma de deflexiones por parte de los geófonos instalados sobre la barra rígida inferior del FWD.

El manejo y operación del equipo está condicionado a la conexión que se debe realizar entre el cable de transmisión de datos del FWD (ver figura 1) y un computador portátil específico en el cual se encuentra instalado directamente de fábrica el software que controla el deflectómetro, denominado por JILS como JTEST. Una vez el equipo portátil es acondicionado en la cabina del vehículo remolque, el deflectómetro de impacto puede ser operado por un solo usuario.

**Figura 2. Acondicionamiento del equipo portátil en la cabina del vehículo remolque.**



FUENTE: [www.jilsfwd.com](http://www.jilsfwd.com), 2010.

El software encargado del funcionamiento del FWD permite establecer el valor de la carga a aplicar, así como el número de impactos a realizar sobre el pavimento, los cuales pueden ser variados a discreción por el usuario en función de la capacidad resistente a la que fue diseñada la estructura, el estado físico de la misma, el tipo de análisis a realizar, etc. Dentro de la información más importante capturada por el equipo se encuentran el valor de la carga real aplicada, las deflexiones medidas por cada uno de los geófonos instalados, la temperatura promedio del ambiente al momento del ensayo y la temperatura superficial del pavimento, entre otras.

### **USO Y OPERACIÓN DEL FWD**

Una vez se han realizado todas las conexiones requeridas entre el FWD y el equipo portátil que controla su operación es posible iniciar con el proceso de calibración de los geófonos, una actividad previa y muy importante antes de la medición de deflexiones sobre la estructura de pavimento.

Al abrir el software JTEST nos encontramos con un ambiente de trabajo muy amigable para el usuario (ver figura 3), en el cual podemos observar unas casillas de información en la margen superior izquierda referentes al número de la estación en que realiza el ensayo, la línea o carril en que fue tomada, el abscisado de la estación o punto de toma de la deflexión y un código correspondiente al tipo de estructura de pavimento sobre el que se ejecuta la prueba.

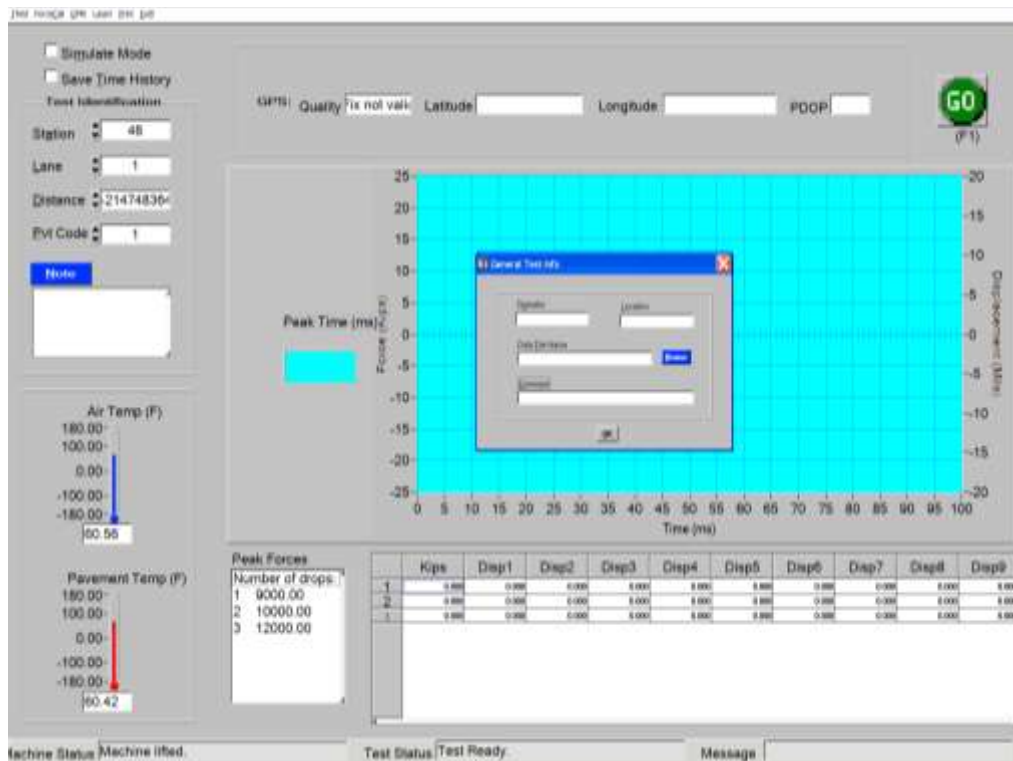
En la parte inferior, de izquierda a derecha, encontramos los valores de temperatura del aire y superficial del pavimento capturados por unos sensores internos propios del equipo (en grados Fahrenheit), un cuadro resumen con el número de golpes a aplicar y el valor de la carga de impacto (en libras) de cada uno de ellos, e información relacionada en columnas donde se encuentran el valor de la carga aplicada (en kilo libras) y las deflexiones medidas por los geófonos (en milésimas de pulgada) que hayan sido instalados a lo largo de la barra rígida sobre el cual están soportados.

Si durante las pruebas de deflectometría, al equipo FWD pudiera ser adicionado un sistema de posicionamiento global (GPS), sería posible capturar información correspondiente a la Latitud y Longitud del área de estudio, la cual sería almacenada como datos de entrada en las casillas de la parte superior del software.

Es importante resaltar que en el ambiente de trabajo presentado en la figura 3, se puede apreciar un gran valor negativo presente en la casilla Distance; esto se debe a que por defecto, cuando no se instala el dispositivo DMI encargado de la medición del abscisado al momento del ensayo, el software introduce dicho valor, el cual puede ser modificado a discreción por el usuario.

La falta de instalación del dispositivo DMI al momento de la captura de datos no es un factor indispensable para el adecuado funcionamiento del FWD, lo que lo convierte en un dato de entrada subsanable en el software.

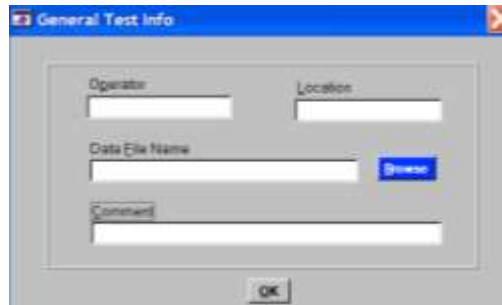
**Figura 3. Ambiente de trabajo del software JTEST al momento de apertura del programa.**



**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

Antes de realizar cualquier prueba de campo es indispensable que el usuario ingrese una información básica correspondiente al nombre del operador del equipo, el sitio o localización donde se realizarán las deflexiones, el nombre bajo el cual se guardará el archivo de datos que arroja el software y un comentario relevante sobre el clima, la condición del pavimento o cualquier otra información relevante durante el desarrollo de la deflectometría.

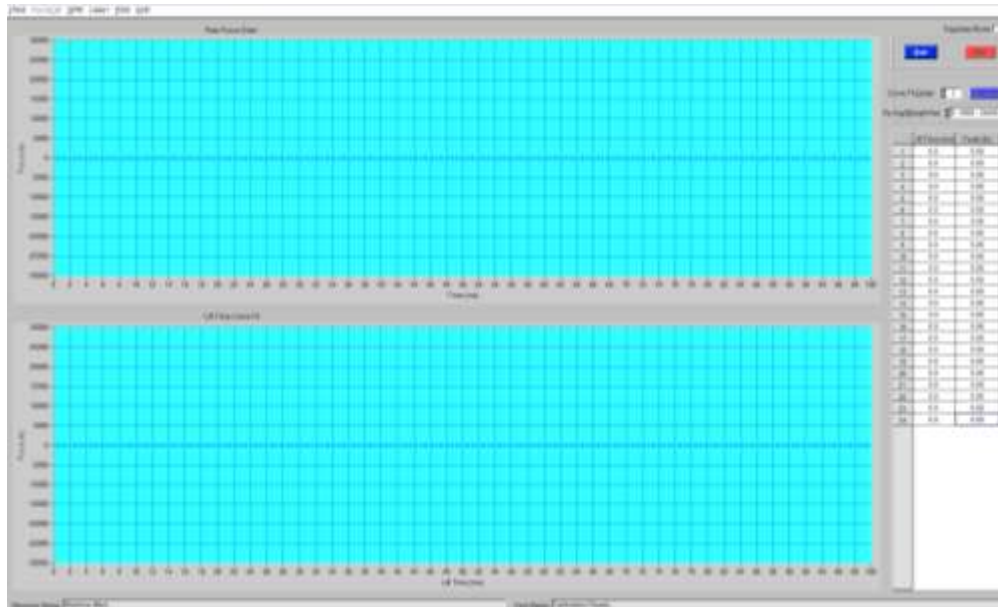
**Figura 4. Cuadro de información básica requerido por el software JTEST para almacenamiento de los datos de deflexión.**



**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

Después de haber asignado un nombre al archivo de trabajo en el software JTEST y antes de ejecutar los ensayos de deflexión se requiere realizar una calibración interna de los geófonos, para garantizar que ellos estén recibiendo información de forma correcta. Este proceso de calibración se desarrolla con base en el empleo de la herramienta ForceCal, localizada en la parte superior izquierda de la barra de menús (ver figura 5).

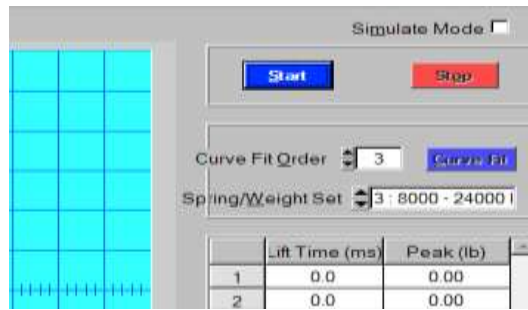
**Figura 5. Entorno de calibración de los geófonos dentro del software JTEST.**



**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

El procedimiento de calibración puede dar inicio una vez se haya fijado en el software el grado polinómico de la curva de ajuste predeterminada y el rango de la carga a aplicar durante las pruebas deflectométricas, información que se encuentra localizada en la parte superior derecha dentro del menú ForceCal (ver figura 6).

**Figura 6 Definición de parámetros previos a la ejecución del ForceCal.**



**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

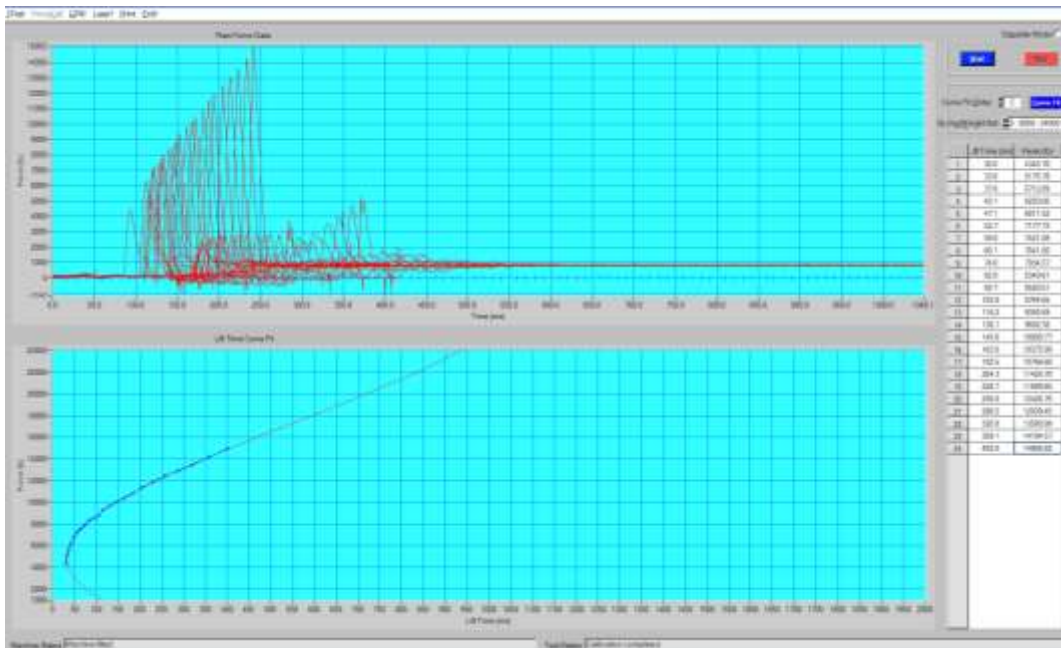
El grado de la curva patrón está definido por defecto en un valor de 3. En el caso de la escogencia del rango de aplicación de carga se establece el nivel 3 (de 4 posibles), el cual estima impactos sobre la estructura de pavimento entre 8000 y 24000 libras, ideal si se requiere hacer análisis de deflexión bajo cargas de diseño de 9000 libras como las que se estiman a los extremos de un eje simple de rueda doble. Ambos parámetros pueden ser modificados con total libertad por el usuario.

El procedimiento del ForceCal o de calibración de los geófonos, consiste en la aplicación de una serie de 24 impactos sobre la estructura de pavimento a diferentes valores de carga, los cuales se van incrementando progresivamente a medida que finaliza la secuencia.

El software captura la información de la carga aplicada a la estructura así como el tiempo de duración de aplicación de la misma, relacionando los valores en una tabla localizada a la margen derecha del entorno de trabajo (ver figura 7).

El proceso de calibración se puede ejecutar las veces que el usuario considere pertinente, finalizando cuando los 24 pares de datos que han sido graficados en la parte inferior del ambiente del ForceCal concuerden lo mejor posible a largo de la curva de ajuste previamente determinada (ver figura 6).

Figura 7. Visualización del entorno de trabajo del menú ForceCal.



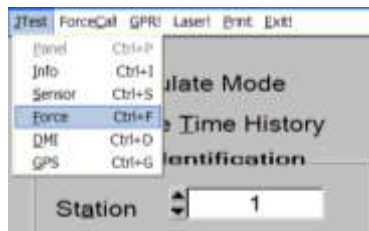
FUENTE: Software JTEST, 2010.

Cuando se haya terminado satisfactoriamente el proceso de calibración interna del equipo se puede dar inicio a la ejecución de las pruebas de deflectometría.

Como primera medida el usuario debe determinar el número de la estación en el que se realizará el impacto, la línea o carril sobre el cual se tomarán las deflexiones, la incorporación manual de la distancia o abscisado correspondiente a dicha estación (si no se posee un DMI instalado), el código asignado según el tipo de estructura de pavimento y el número de golpes estimados con su debida magnitud de impacto.

Para la selección de estos dos últimos parámetros se debe ingresar a la herramienta Force incluida dentro del menú superior JTest (ver figura 8).

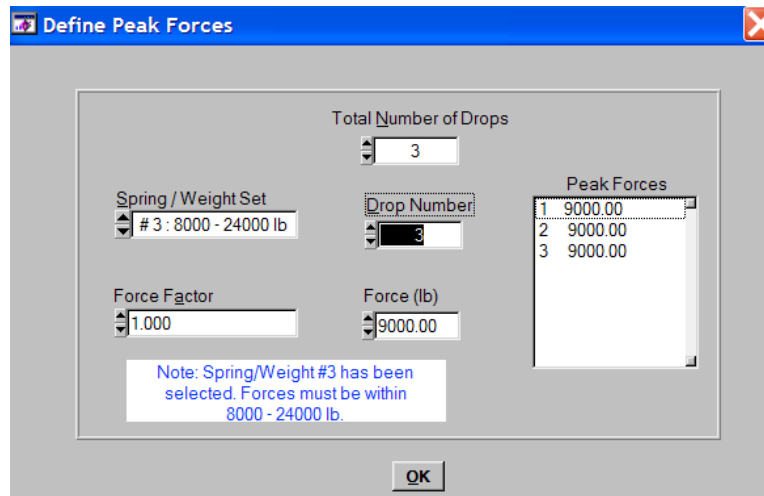
Figura 8. Selección del submenú Force dentro del software JTEST.



FUENTE: Software JTEST, 2010.

Al interior del menú Force, el usuario tendrá la posibilidad de modificar el rango de carga, el número de golpes y la magnitud del impacto a aplicar (ver figura 9).

Figura 9. Cuadro de definición de cargas.



FUENTE: Software JTEST, 2010.

En la casilla que solicita la inclusión del rango de carga a trabajar (Spring/Weight Set), el usuario podrá escoger entre 4 diferentes opciones, donde el nivel de carga usual a emplear es el número 3, el cual comprende valores de impacto entre 8000 y 24000 libras.

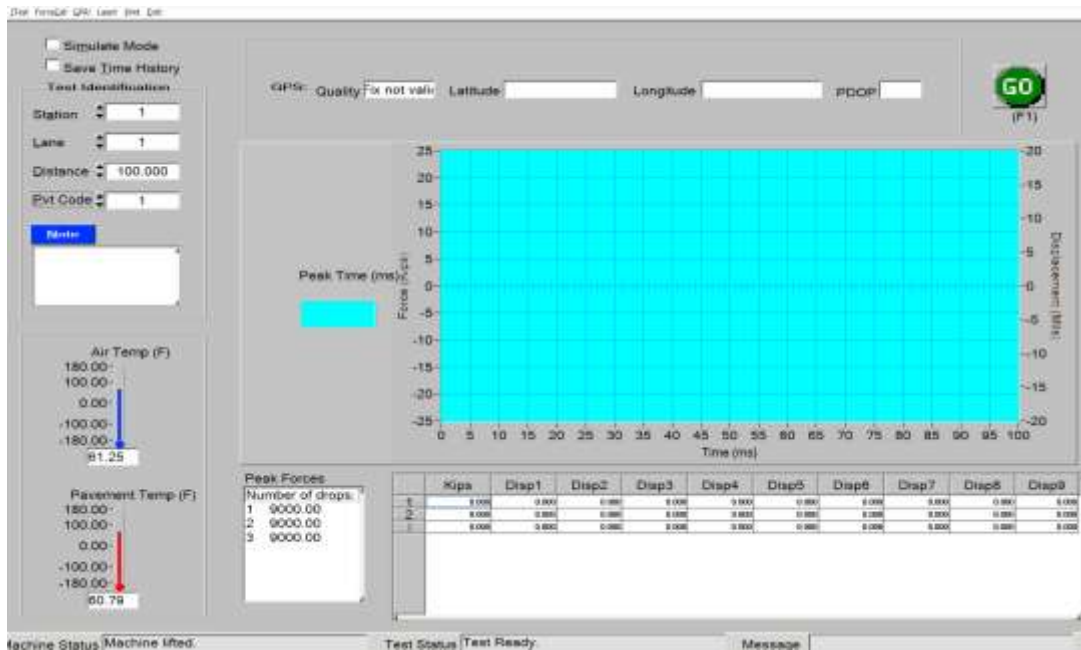
La opción que se presenta para modificar la casilla Force Factor, corresponde a un factor de afectación de incremento o decremento en el valor de la carga, el cual generalmente se adopta igual a 1,0, a menos que exista alguna observación por parte del fabricante del equipo que obligue a alguna variación del mismo. El fabricante puede validar los factores de corrección asociados a la carga y a la recepción de señal por parte de los geófonos, a través de un procedimiento de verificación por medio de un software de asistencia remota.

El número de golpes a realizar en el ensayo se puede modificar en la casilla Total Number of Drops. Las metodologías de deflectometría sugieren que al momento de la prueba se apliquen un total de 3 impactos sobre la estructura de pavimento para cada punto de control, esto con el fin de minimizar los posibles errores que se pueda tener por efectos de acomodación de los materiales que conforman las diferentes capas al momento de la aplicación de carga.

Por último, el número de cada golpe y su correspondiente magnitud se pueden modificar bajo las opciones Drop Number y Force (lb). Cuando se evalúan estructuras de pavimento que han sido diseñadas bajo un eje equivalente de 8,2 ton., como es lo usual en las vías de nuestro país, el valor de la carga que se emplea para el impacto es de 9000 lbs.

Al concluir las modificaciones pertinentes en el cuadro de carga (Define Peak Forces) y guardar sus cambios, el usuario accederá al control del equipo justo de iniciar el procedimiento de toma de deflexiones (ver figura 10).

**Figura 10. Ambiente del software actualizado para el control de toma de deflexiones.**



**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

Si revisamos detenidamente la figura 10, podemos observar que las modificaciones realizadas en cuadro de carga de la figura M ya se encuentra actualizadas.

En la parte inferior se aprecia bajo el cuadro de encabezado Peak Forces, que se encuentran relacionados un total de 3 golpes a aplicar a la estructura, cada uno de ellos con una magnitud de carga de 9000 libras.

En el cuadro inferior derecho se visualizarán los valores medidos al momento del ensayo para carga aplicada (Kips) y deflexiones (Disp 1-9). Antes de ejecutar el procedimiento de impacto estas casillas se encontrarán en cero.

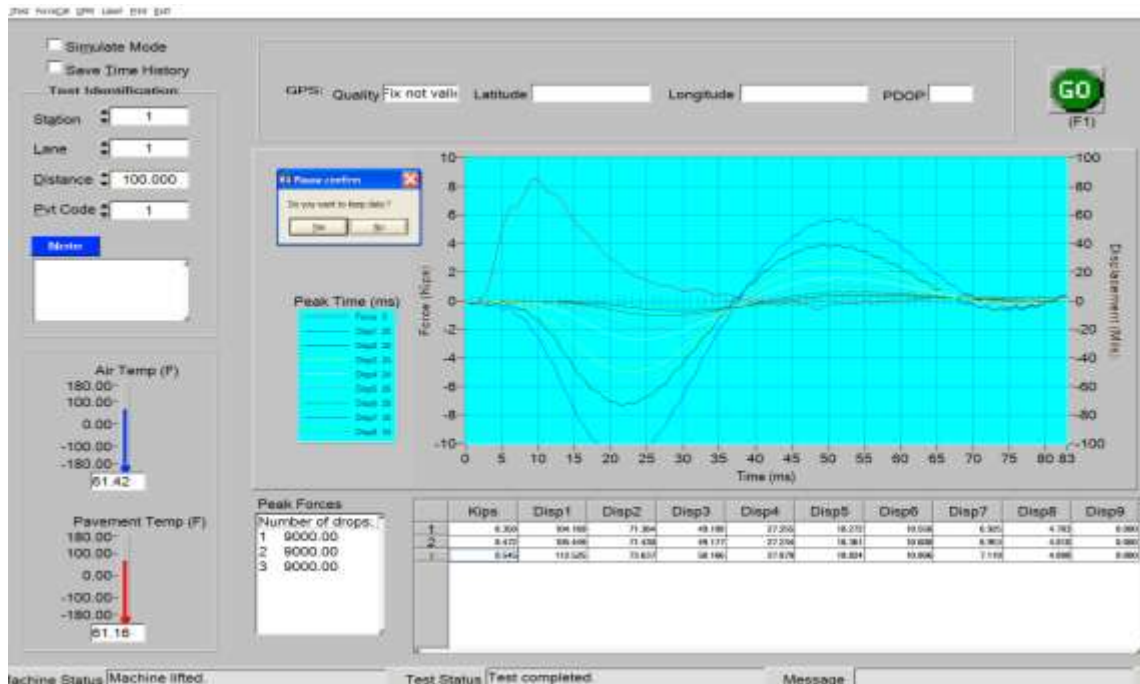
Los valores para la temperatura del aire y superficial del pavimento son medidos directamente por el equipo a través de un par de sensores independientes al momento de la ejecución del ensayo. La información medida es relacionada en las casillas Air Temp y Pavement Temp, ambas en grados Fahrenheit.

Para un mayor entendimiento en la información que se deberá facilitar en la parte superior izquierda en las casillas correspondientes a Station, Lane, Distance, Pvt Code y Note, éstas serán abordadas al momento de la interpretación de los resultados obtenidos por el software JTEST.

En esta etapa, el inicio de operación para la pruebas de deflectometría está supeditada a la voluntad del usuario con solo emplear el comando GO, localizado en la parte superior derecha del software o a través del comando F1 del teclado.

Una imagen con el resultado de la ejecución del proceso de deflectometría desarrollado por el software JTEST se puede observar en la figura 11.

**Figura 11. Captura de datos generados por la realización de pruebas de deflectometría.**



FUENTE: Software JTEST, 2010.

Cuando el equipo FWD ha terminado el proceso de toma de deflexión (ver figura 11), el software presenta en la parte inferior derecha la información capturada por la celda de carga y por cada uno de los geófonos instalados previamente a la prueba (ver figura 12).

**Figura 12. Información de carga y deflexiones medidas después de la ejecución de la prueba.**

	Kips	Disp1	Disp2	Disp3	Disp4	Disp5	Disp6	Disp7	Disp8	Disp9
1	8.350	104.169	71.364	49.198	27.250	18.272	10.556	6.925	4.783	0.000
2	8.472	105.449	71.430	49.177	27.234	18.361	10.600	6.953	4.810	0.000
3	8.545	112.525	73.637	50.166	27.879	18.824	10.806	7.119	4.888	0.000

FUENTE: Software JTEST, 2010.

Es importante recordar que la medición del impacto realizada por la celda de carga se presenta en Kips o kilolibras, por lo que los valores relacionados en la figura 12 se encuentran en un rango entre 8,3 a 8,5 Kips. Al interior del software se considera que la carga aplicada es adecuada cuando la variación entre el valor medido y el valor nominal estimado (de 9000 lbs) no supera una diferencia por exceso o por defecto de un 10%.

Las lecturas de deflexión captadas por los geófonos se relacionan en las columnas Disp1 a Disp9 y se encuentran medidas en mils ó milésimas de pulgada. Cada una de estas lecturas están asociadas a la distancia existente entre el sensor que toma la deflexión y el centro del plato de carga.

La configuración de los geófonos que posee el FWD JILS-20 a lo largo de la barra rígida se relaciona en la tabla 1.

**Tabla 1. Relación de los geófonos con su distancia al centro de plato de carga**

Geófono	Disp1	Disp2	Disp3	Disp4	Disp5	Disp6	Disp7	Disp8	Disp9
Distancia (cm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	20,0

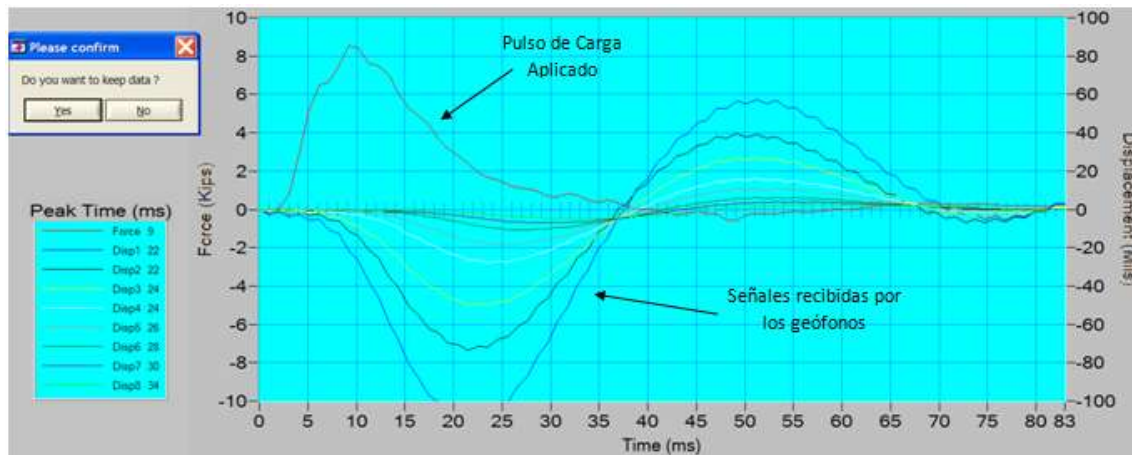
FUENTE: Elaboración propia, 2010.

Los valores de deflexión medidos con el FWD poseen una tendencia de orden decreciente, lo que indica que el geófono 1 (Disp1) obtendrá el mayor valor comparado con el menor valor del geófono 8 (Disp8) (ver figura 12); esto debido a que el sensor más alejado del plato de carga recibirá una menor cantidad de señal por efecto de la disipación de la onda de impacto bajo la estructura de pavimento.

En los resultados de deflexión que se observan en la figura 12, el geófono 9 (Disp9) se encontraba instalado a lo largo de la barra de soporte inferior del FWD, pero al momento de la selección del número de sensores que capturarían señal no fue activado, razón por la cual su valor relacionado figura como cero (0,00).

Otra información importante que se puede resaltar después de la ejecución de la prueba de deflectometría se relaciona en la figura 13 y está relacionada con la visualización de la onda generada al momento de aplicación de la carga y la señal capturada por cada uno de los geófonos.

**Figura 13. Grafica producto de la ejecución de la deflectometría que representa la onda producida por el impacto y la señal capturada por los geófonos**



FUENTE: Software JTEST, 2010.

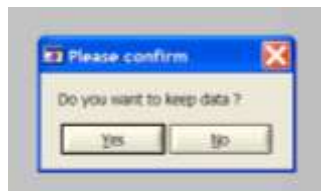
Para interpretar las curvas graficadas se debe tener en cuenta la convención en colores localizada a la parte izquierda del sistema coordenado. La primera curva que se puede observar es la correspondiente al pulso de la onda de carga, la cual relaciona la carga aplicada (en Kips) en el eje de las ordenadas y el tiempo pico en que se genera la máxima magnitud de la onda (en milésimas de segundo, ms), así como su proceso de disipación en el tiempo, en el eje de las abscisas.

Las curvas que corresponden a las señales capturadas por los geófonos relacionan el valor de deflexión medida (en milésimas de pulgada, Mils) en el eje de las ordenadas y el tiempo de llegada a cada sensor (en ms) en el eje de las abscisas; esto permite entender el porqué la señal que capta

el geófono 1 (Disp1) posee un menor tiempo pico máximo, que la señal recogida por el geófono 9 (Disp9).

Después de verificar que la información obtenida tras la ejecución de la prueba de deflectometría es coherente y satisface el comportamiento esperado por el usuario, es posible confirmar al software que se desean almacenar los datos medidos, para luego continuar con el proceso de ensayo en los puntos de control que se tengan planeados (ver figura 14).

**Figura 14. Confirmación de almacenamiento de datos al finalizar una prueba deflectométrica.**

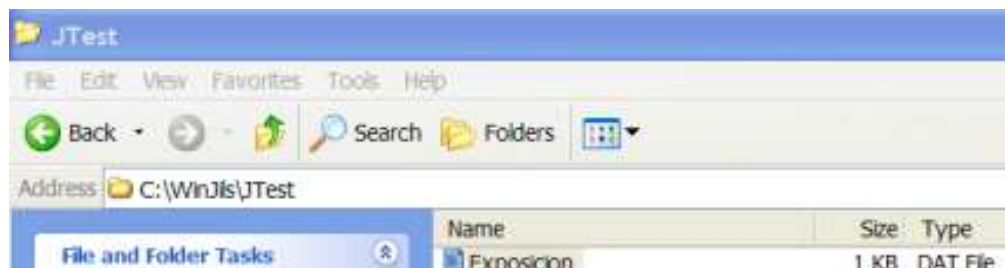


**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

### **INTERPRETACIÓN DEL ARCHIVO DE DATOS OBTENIDO DESPUÉS DE LA DEFLECTOMETRÍA**

Toda la información que fue almacenada por el usuario después de los ensayos de deflectometría se guarda de forma automática en una carpeta al interior de los archivos del software JTEST, cuyo directorio de acceso es el siguiente: C:\WinJils\JTest, tal como se observa en la figura 15.

**Figura 15. Ubicación de la carpeta que permite acceder a la información almacenada por el software JTEST después de finalizar las pruebas con el FWD.**

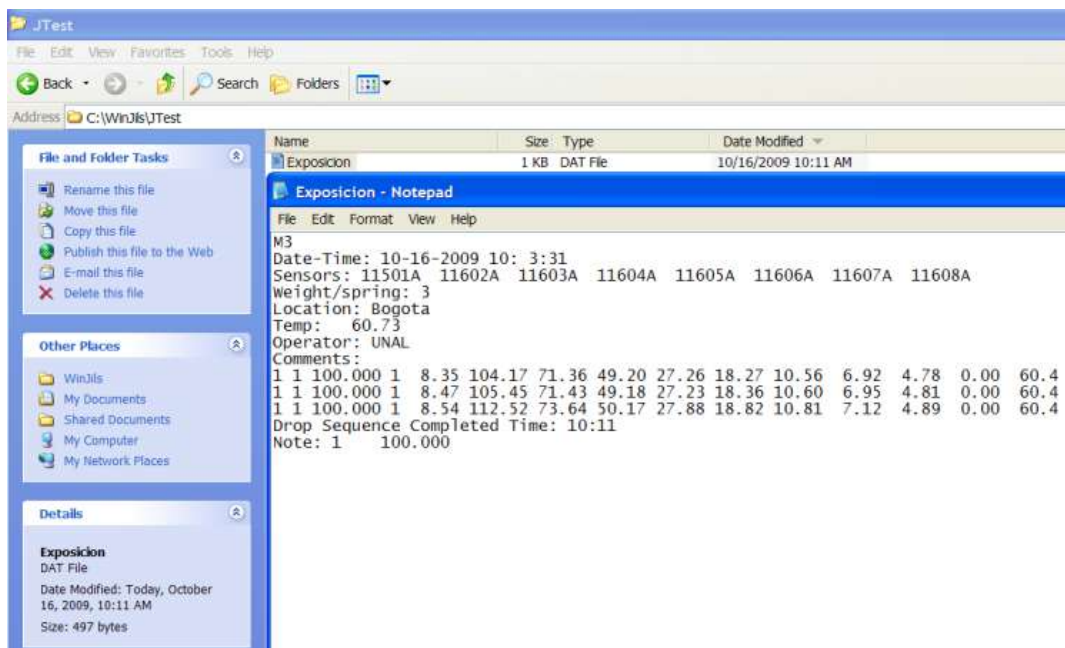


**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

Los archivos creados con la información de la deflectometría se guardan bajo la extensión .DAT, y pueden ser leídos con el empleo del block de notas o Notepad.

Al abrir el archivo .DAT encontraremos una serie de datos dispuestos en filas y columnas, los cuales poseen toda la información que fue recopilada por el software JTEST al momento de la ejecución de los ensayos de deflectometría (ver figura 16).

**Figura 16. Información contenida dentro del archivo .DAT.**



**FUENTE: Software JTEST, 2010.**

Para interpretar la información contenida al interior del archivo .DAT, emplearemos a manera de ejemplo el archivo denominado “Exposicion”, ilustrado en la figura 16, realizando la descripción de cada una de las filas expuestas en orden descendente.

La primera fila del archivo relacionada como M3, se crea de forma automática en el programa, por lo tanto en todos los archivos de salida aparecerá este contenido como encabezado.

La segunda fila, Date-Time: 10-16-2009 10:03:31, es donde se encuentra la información correspondiente a la fecha y hora exacta en que fue encendido el equipo de deflectometría, antes de dar inicio a la ejecución de los ensayos programados.

La tercera fila, Sensors: 11501A 11602A 11603A 11604A 11605A 11606A 11607A 11608A, identifica la cantidad de geófonos que se encuentran programados en el equipo para capturar la información de deflectometría al momento del ensayo. Al momento de la prueba tomada como ejemplo, sobre la barra rígida se encontraban instalados nueve (9) sensores pero sólo se emplearon ocho (8) para registrar deflexiones, por lo que en la penúltima columna donde se relaciona dicha información se puede observar un cero como dato de salida.

La cuarta fila, Weight/spring: 3, permite conocer el rango de aplicación de carga al que estaba programado el equipo al momento del ensayo.

La quinta fila, Location: Bogota, ofrece información sobre la ubicación, ciudad, área o zona en donde se realizaron las pruebas de deflectometría, siempre y cuando ésta haya sido ingresada en el cuadro de información general al inicio de la prueba.

La sexta fila, Temp: 63.73, ofrece información sobre la temperatura ambiente medida al momento de las pruebas de impacto, en grados Fahrenheit, y solo se almacena una vez al inicio de las mismas como único dato para toda la prueba.

La séptima fila, Operator: UNAL, ofrece la identificación del operador encargado de la utilización del equipo durante las pruebas de deflectometría, siempre y cuando esta información haya sido almacenada al inicio de las pruebas.

La octava fila, Comments: , almacena los comentarios u observaciones que pueden ser de interés relevante durante la ejecución de las pruebas de impacto referentes al estado del clima, la condición física del pavimento, niveles de tráfico, etc.

Después de la octava fila se encuentra almacenada información sobre las diferentes estaciones donde se realizaron las pruebas de carga, tales como la magnitud del impacto, las deflexiones medidas, la temperatura superficial del pavimento, entre otras (ver figura 17).

**Figura 17. Datos de carga, deflexión y temperatura incluidos dentro del archivo .DAT.**

1	1	100.000	1	8.35	104.17	71.36	49.20	27.26	18.27	10.56	6.92	4.78	0.00	60.4
1	1	100.000	1	8.47	105.45	71.43	49.18	27.23	18.36	10.60	6.95	4.81	0.00	60.4
1	1	100.000	1	8.54	112.52	73.64	50.17	27.88	18.82	10.81	7.12	4.89	0.00	60.4

FUENTE: Software JTEST, 2010.

La interpretación de cada una de las columnas presentadas en la figura 17 se desarrollará a continuación de izquierda a derecha.

La primera columna, la cual contiene el número 1, hace referencia al número de la estación donde se realizó el ensayo de deflectometría. Si durante toda la prueba se llevaran a cabo 20 ensayos en diferentes sitios, el valor correspondiente a la columna analizada variaría consecutivamente según el número de la estación en que realice el impacto, entre 1 y 20 respectivamente.

La segunda columna, número 1 en nuestro ejemplo, obedece a un código de identificación que hace referencia al carril sobre el cual se tomó la prueba deflectométrica; código que puede ser creado o modificado a discreción por el usuario según el número de carriles que posea la vía analizada. Si se desarrollaran pruebas en una vía de 3 carriles, por ejemplo, la identificación podría ser de la siguiente forma: número 1 para el carril derecho, número 2 para el carril central y número 3 para el carril izquierdo.

La tercera columna nos determina el abscisado acumulado correspondiente a la estación donde se realiza la prueba de impacto. Si el FWD tiene instalado al momento de la prueba un DMI o un odómetro, este dato es capturado automáticamente durante el ensayo, de lo contrario, el valor de la abscisa puede ser introducido manualmente por el usuario, tal como ocurrió con el valor de cien (100.000) observado en el ejemplo. Cuando no se incorpora ninguna información en la casilla Distance al momento de la prueba, el software asume por defecto un gran valor negativo (-147483648.000), el cual puede ser modificado posteriormente de forma manual en el archivo .DAT que arroja el equipo.

La cuarta columna asigna un código de referencia para identificar el tipo de estructura de pavimento sobre el cual se desarrollan las pruebas deflectométricas. Usualmente se emplea el número 1 para pavimentos flexibles y el número 2 para pavimentos rígidos.

La quinta columna presenta la información correspondiente a la magnitud de la carga aplicada sobre la estructura de pavimento al momento del impacto, en kilolibras (Kips). Los valores relacionados en el ejemplo son 8.35, 8.47 y 8.54, lo que permite interpretar que se realizaron 3 impactos en la misma estación con magnitudes de 8350, 8470 y 8540 libras. Se debe resaltar que las cargas aplicadas no superan una diferencia del 10% en magnitud, comparada con una carga nominal de 9000 libras establecida antes de iniciar el ensayo.

De la sexta a la penúltima columna se relacionan los valores de deflexión medidos por cada uno de los geófonos, del número 1 al número 9 respectivamente, en milésimas de pulgada (Mils). Entre más cercano se encuentre el sensor al centro de aplicación de la carga, mayor será el valor de deflexión medido, de allí la tendencia decreciente de los datos consignados. La información correspondiente al geófono 9 se puede observar que se encuentra en cero (0.00), debido a que este sensor no fue activado para medir deflexiones dentro de la configuración interna del equipo, la cual puede ser cambiada a discreción por el usuario.

La última columna contiene la información correspondiente a la temperatura medida sobre la superficie del pavimento al momento del impacto, en grados Fahrenheit. Este dato no es una temperatura constante y puede variar de una estación a otra.

Las dos últimas filas pendientes por interpretar en la figura 17 corresponden a la hora en que se ejecutó el ensayo en cada una de las estaciones (Drop Sequence Completed Time: 10:11) y a la abscisa de la estación en la cual se realizó la secuencia de impacto (Note: 1 100.000).

**ANEXO 3. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TRAMO DE PRUEBA.**



**ANEXO 4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO PARA ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE SOBRE BASE GRANULAR.**

Con base en los resultados del ensayo Proctor modificado realizados por el contratista, se decidió evaluar el valor promedio obtenido para la humedad óptima y el peso unitario seco, de tal forma que se pudieran comparar con los resultados obtenidos en esta investigación.

**Resultados de humedad óptima y densidad seca máxima obtenidos de ensayos Proctor modificado.**

		ENSAYO PROCTOR MODIFICADO		
MATERIAL	LABORATORIO	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad óptima promedio (%)
BASE GRANULAR	EIE	8,00	2135,00	8,82
		9,30	2038,00	
		8,50	2121,00	
		9,30	2019,00	
		9,00	2104,00	
	UNAL	9,20	2118,00	Densidad seca máxima promedio (kg/m <sup>3</sup> )
				2083,40

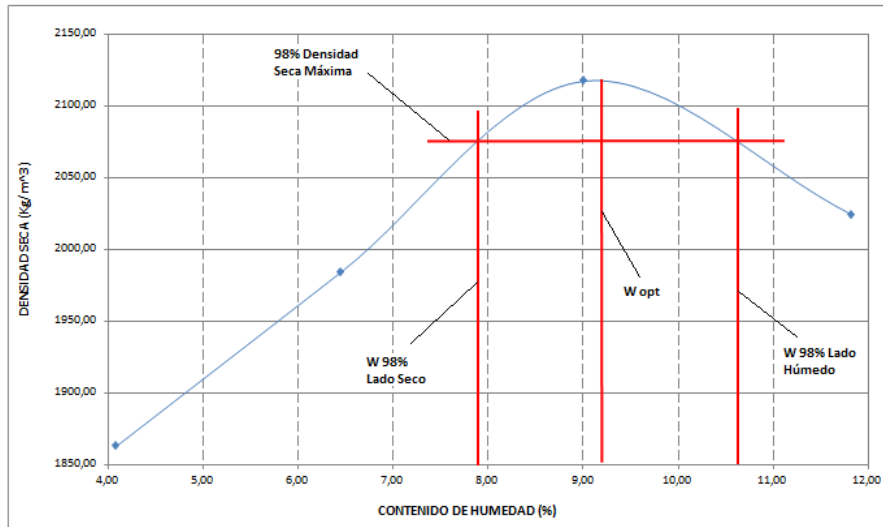
Para seleccionar la humedad óptima de campo adecuada se analizaron las densidades de campo tomadas por el contratista que correspondieran a resultados superiores al 98% de la densidad seca máxima de los ensayos Proctor presentados anteriormente.

**Resultados de densidades de campo tomadas por el Contratista sobre la base granular.**

		DENSIDADES DE CAMPO		
MATERIAL	LABORATORIO	Humedad de campo (%)	Densidad seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación (%)
BASE GRANULAR	EIE	4,00	2145,00	100,5
		6,00	2137,00	100,1
		7,80	2130,00	99,8
		8,40	2082,00	97,5
		6,00	2094,00	98,1
		6,50	2117,00	99,2
		6,20	2104,00	98,5
		4,40	2127,00	99,6
		4,00	2144,00	100,4
		7,00	2035,00	99,9
		7,30	2039,00	100,0
		8,20	2079,00	98,0
		8,30	2087,00	98,4
		8,60	2095,00	98,8
		8,50	2121,00	100,0
		8,50	2097,00	98,9
		8,20	2017,00	99,9
		5,20	2026,00	100,3
		5,50	2027,00	100,4
		6,00	2021,00	100,1
5,00	2106,00	98,6		
7,60	2094,00	98,1		
7,00	2120,00	99,3		
4,50	2089,00	97,8		

Debido a la similitud en los resultados entre el ensayo Proctor realizado en la Universidad Nacional y el valor promedio de los resultados obtenidos por el contratista, se adopta como curva patrón el ensayo de la presente investigación.

**Curva de patrón adoptada con base en el ensayo realizado en el laboratorio de la Universidad Nacional.**



**Resumen de resultados obtenidos de la curva patrón.**

Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (kg/m³)	98% del Proctor Mod. (kg/m³)	Humedad para el 98% del P.M. del lado seco	Humedad para el 98% del P.M. del lado húmedo
9,20	2118,00	2075,64	7,90	10,63

Con base en la franja de humedades adoptadas para el 98% de la densidad seca máxima se realiza un filtrado de los resultados obtenidos de las densidades de campo.

**Densidades de campo filtradas para el rango de humedades asociadas al 98% de la densidad seca máxima.**

MATERIAL	LABORATORIO	DENSIDADES DE CAMPO		
		Humedad de campo (%)	Densidad seca máxima (kg/m³)	Compactación (%)
BASE GRANULAR	EIE	8,40	2082,00	97,5
		8,20	2079,00	98,0
		8,30	2087,00	98,4
		8,60	2095,00	98,8
		8,50	2121,00	100,0
		8,50	2097,00	98,9
		8,20	2017,00	99,9

Como resultado se obtiene el valor de humedad óptimo al cual se conformará la primera probeta para el ensayo de módulo resiliente en el material de base granular igual a 8,40%, el cual corresponde al promedio de las humedades de campo filtradas anteriormente.

## ANEXO 5. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN LABORATORIO

**Moldes para la conformación de las probetas.**



**Material seco antes del procedimiento de mezclado con la cantidad de agua requerida.**



**Proceso de compactación por impacto para la conformación de las probetas.**



**Montaje de la probeta en la cámara triaxial.**



**Etapa final del ensayo: desmonte, pesaje y colocación al horno de la probeta fallada.**



## ANEXO 6. NÚCLEOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EMPLEADOS PARA EL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO Y RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA BÁSICA.

Muestras asfálticas cortadas en laboratorio para la realización del ensayo de módulo dinámico.



La muestra de la izquierda corresponde a la mezcla densa en caliente tipo MD-12 y la muestra de la derecha a la mezcla tipo MD-20.

### Resumen de resultados obtenidos de la caracterización física básica (laboratorio E.I.E.).

	Fecha Ensayo	Granulometría	Contenido de Asfalto (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
Concreto Asfáltico MD-20	08/09/2009	Cumple con la Banda Granulométrica	5,8	2188	1322	3,1
			5,7	2185	1307	3,1
			5,4	2197	1305	3,2
			5,4	2189	1299	3,0
			5,4	2183	1327	3,1
Concreto Asfáltico MD-12	08/09/2009	Cumple con la Banda Granulométrica	6,3	2189	1312	3,1
			6,1	2188	1331	3,2
			6,0	2194	1348	3,2
			6,0	2185	1312	3,2
			5,8	2191	1302	3,1

Montaje del núcleo de pavimento para la realización del ensayo de módulo dinámico.



## ANEXO 7. METODOLOGÍAS DE RETROCÁLULO EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN.

### 1. Metodologías de cálculo directo

Dentro de las metodologías de cálculo directo se encuentran el método Yonapave, empleado para materiales de subrasante y la ecuación de Dormann y Metcalf, formulada para la capa granular.

#### Método Yonapave

Este método estima de forma directa el módulo resiliente de la subrasante a partir de valores de deflexión, basado en la teoría del modelo elástico de Hogg. Su expresión es la siguiente:

$$E_o = m * \left[ \frac{P}{D_o} \right] * l_o^n$$

Donde:

Eo : Es el Módulo de la Subrasante (MPa).

P : Presión del plato de carga del deflectómetro (kPa).

Do : Deflexión máxima bajo el plato de carga (0,001 mm).

lo : Longitud característica del cuenco de deflexión (cm).

$$l_o = A * e^{B * AREA}$$

$$AREA = \frac{6(D_o + 2D_{300} + 2D_{600} + D_{900})}{D_o}$$

Donde:

Di : Deflexiones a las distancias indicadas, desde el centro de aplicación de la carga (0,001 mm).

A, B, m, n : Coeficientes de ajuste.

**Coeficientes de ajuste A, B, m y n empleados en la metodología de YONAPAVE.**

RANGO DE AREA	A	B	m	n
Mayor o igual a 23	3.275	0.1039	926.9	-0.8595
Mayor o igual a 21 y menor de 23	3.691	0.0948	1152.1	-0.8782
Mayor o igual a 19 y menor de 21	2.800	0.1044	1277.6	-0.8867
Menor de 19	2.371	0.1096	1344.2	-0.8945

FUENTE: Guía de Rehabilitación del INVIAS, 2008.

#### Ecuación de Dormann y Metcalf

Esta formulación determina el módulo de las capas granulares mediante una correlación donde se debe conocer previamente el módulo resiliente de la subrasante y el espesor de la capa granular, tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$E_{base} = 0.2 * (h^{2.45}) * E_{sub}$$

Donde:

Ebase: Módulo resiliente de la base granular (MPa).  
 h2 : Espesor de la capa granular (mm).  
 Esub : Módulo resiliente de la subrasante (MPa).

## 2. Metodología por medio de ecuaciones de regresión

Las ecuaciones de regresión utilizadas pertenecen al departamento de transporte del estado de Washington (WASDOT) y a la Universidad de Carolina del Norte (UNC). Las primeras son aplicables para sistemas tricapa y permiten obtener los módulos de la subrasante, del material granular y de la carpeta asfáltica; la última sólo es aplicable para conocer el módulo de la capa asfáltica.

### Ecuaciones WASDOT

#### Capa de subrasante

Las ecuaciones presentadas a continuación poseen índices de correlación ( $R^2$ ) iguales a 0,99 y sólo son aplicables para determinar el módulo de la subrasante:

$$E_0 = -37.1 + 34.3*[P/D_{900}]$$

$$E_0 = -7.8 + 22.6*[P/D_{1200}]$$

$$E_0 = -24.2 + 52.9*[2P/(D_{900} + D_{1200})]$$

Donde:

Eo : Módulo de la subrasante (kg/cm<sup>2</sup>).  
 P : Carga aplicada sobre una placa de 300 mm de diámetro (kg).  
 D900: Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga (0,001 mm).  
 D1200: Deflexión a 1200 mm del centro de aplicación de la carga (0,001 mm).

Para la investigación se opta por emplear la ecuación basada en la deflexión a 1200 mm del centro del plato de carga, debido a que se estima que las deflexiones más alejadas del centro del impacto ofrecen una respuesta exclusiva asociada a la capa de subrasante.

#### Capa granular

La siguiente expresión puede ser usada para determinar el módulo resiliente de la capa granular y posee un índice de correlación ( $R^2$ ) igual a 0,70.

$$\log E_G = 0.50634 + 0.03474 \left[ \frac{5.9}{H_{CA}} \right] + 0.12541 \sqrt{\frac{5.9}{H_G}} - 0.09416 \sqrt{\frac{H_{CA}}{H_G}} + 0.51386 \log E_0 + 0.2454 \log \left[ \frac{P * A_1}{D_0^2} \right]$$

Donde:

EG: Módulo de la capa granular (psi).  
 P : Carga aplicada sobre una placa de 300 mm de diámetro (lb).  
 Hca : Espesor de la capa de concreto asfáltico (in).  
 HG : Espesor de la capa granular (in).  
 Eo : Módulo de la subrasante (psi).  
 Do : Deflexión bajo el centro de aplicación de la carga (in).

A<sub>1</sub> : Área aproximada bajo el cuenco de deflexión hasta una distancia de 900 mm.

$$A_1 = 2[2(D_0 + D_{200}) + (D_{200} + D_{300}) + 3(D_{300} + D_{600}) + 3(D_{600} + D_{900})]$$

D<sub>200</sub> : Deflexión a 200 mm del centro de aplicación de la carga (in).

D<sub>300</sub> : Deflexión a 300 mm del centro de aplicación de la carga (in).

D<sub>600</sub> : Deflexión a 600 mm del centro de aplicación de la carga (in).

D<sub>900</sub> : Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga (in).

### Capa asfáltica

El módulo de la capa asfáltica puede ser determinado por la siguiente ecuación, cuyo índice de correlación (R<sup>2</sup>) es igual a 0,78.

$$\log E_{CA} = -4.13464 + 0.25726 \left[ \frac{5.9}{H_{CA}} \right] + 0.92874 \sqrt{\frac{5.9}{H_G}} - 0.69727 \sqrt{\frac{H_{CA}}{H_G}} - 0.96687 \log E_0 + 1.88298 \log \left[ \frac{P \cdot A_1}{D_0^2} \right]$$

Donde:

E<sub>CA</sub>: Módulo de la capa asfáltica (psi).

P : Carga aplicada sobre una placa de 300 mm de diámetro (lb).

H<sub>CA</sub> : Espesor de la capa de concreto asfáltico (in).

H<sub>G</sub> : Espesor de la capa granular (in).

E<sub>0</sub> : Módulo de la subrasante (psi).

D<sub>0</sub> : Deflexión bajo el centro de aplicación de la carga (pulgadas).

A<sub>1</sub> : Área aproximada bajo el cuenco de deflexión hasta una distancia de 900 mm.

$$A_1 = 2[2(D_0 + D_{200}) + (D_{200} + D_{300}) + 3(D_{300} + D_{600}) + 3(D_{600} + D_{900})]$$

D<sub>200</sub> : Deflexión a 200 mm del centro de aplicación de la carga (in).

D<sub>300</sub> : Deflexión a 300 mm del centro de aplicación de la carga (in).

D<sub>600</sub> : Deflexión a 600 mm del centro de aplicación de la carga (in).

D<sub>900</sub> : Deflexión a 900 mm del centro de aplicación de la carga (in).

### Ecuación UNC

Esta expresión permite obtener el módulo de la capa asfáltica a partir de métodos de regresión, aunque no hace referencia a cual es el índice de correlación (R<sup>2</sup>) obtenida para la misma.

$$\log E_{CA} = -1.7718 * \log(D_0 - D_{300}) + 0.8395 * \log(D_{300} - D_{600}) - 2.5124 * \log H_{CA} + 0.0756 * H_{CA} + 4.8888$$

Donde:

E<sub>CA</sub> : Módulo de la capa asfáltica (ksi).

H<sub>CA</sub> : Espesor de la capa de concreto asfáltico (in)

D<sub>0</sub> : Deflexión bajo el centro de aplicación de la carga (0,001 in).

D<sub>300</sub> : Deflexión a 300 mm del centro de aplicación de la carga (0,001 in).

D<sub>600</sub> : Deflexión a 600 mm del centro de aplicación de la carga (0,001 in).

### 3. Ecuaciones según metodología de diseño AASHTO

La metodología de retrocálculo de la guía AASHTO permite determinar sólo el módulo resiliente de la subrasante y está basada en el modelo monocapa de la teoría de Boussinesq, a través de la siguiente expresión:

$$M_R = \frac{P \cdot (1 - \mu^2)}{\pi \cdot d_R \cdot r}$$

Donde:

$M_R$  = Módulo resiliente de la subrasante (psi).

$P$  = Carga aplicada (lb).

$d_R$  = Deflexión obtenida a una distancia  $R$  del centro de aplicación de la carga (in).

$r$  = Distancia entre el centro de aplicación de la carga y el geófono que capta la deflexión (in).

$\mu$  = Coeficiente de Poisson del material de subrasante.

Si se considera un coeficiente de Poisson de 0.5 la ecuación queda reducida a la siguiente expresión:

$$M_R = \frac{0,24 \cdot P}{d_R \cdot r}$$

La guía de diseño AASHTO recomienda emplear una distancia ( $r$ ) para el cálculo del módulo resiliente, que sea mayor o igual a 0,7 veces el radio del bulbo de esfuerzos, determinado por medio de la siguiente expresión:

$$r \geq 0,7a_e$$

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

Donde:

$r$  = Distancia desde el centro del plato de carga (in).

$a_e$  = Radio del bulbo de esfuerzos éntre la interfaz subrasante – estructura de pavimento (in).

$a$  = Radio del plato de carga (in).

$D$  = Espesor total del pavimento sobre la subrasante (in).

$E_p$  = Módulo equivalente de todas las capas del pavimento sobre la subrasante (psi).

Una vez conocido el valor del módulo resiliente de la subrasante es posible determinar el módulo equivalente del pavimento  $E_p$ , el cual representa la estructura de pavimento por un modelo bicapa, donde la capa inferior que representa la subrasante posee una profundidad infinita y un módulo  $M_R$ ; y su capa superior es la simplificación del pavimento con un espesor total  $D$  y un módulo equivalente  $E_p$ .

La expresión propuesta por la guía AASHTO para la determinación del módulo equivalente del pavimento  $E_p$ , se relaciona a continuación:

$$d_o = 1,5 * p * a \left[ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{D}{a} \right)^3 \frac{E_p}{M_r} \right]^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}}}{E_p} \right]$$

Donde:

p = Presión de contacto del plato de carga (psi).

do = Deflexión medida bajo el plato de carga, ajustada a una temperatura de 20°C para mezclas asfálticas (in).

a = Radio del plato de carga (in).

D = Espesor total del pavimento sobre la subrasante (in).

Ep = Módulo equivalente de todas las capas del pavimento sobre la subrasante (psi).

Mr = Módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (psi).

#### 4. Metodología por medio de software de retrocálculo

Los software de retrocálculo empleados en la investigación fueron el EVERCALC 5,0 de uso libre y el DAPS con licencia de uso asignada a la Universidad Nacional.

##### EVERCALC 5,0

El software EVERCALC es un programa para computador que determina los módulos de cada una de las capas que conforman la estructura de un pavimento, basado en un acercamiento iterativo ente los valores de deflexión teóricos internamente calculados y los valores de deflexión medidos a partir de equipos FWD, considerando que las capas que forman la estructura poseen un comportamiento elástico.

Este software se base en el programa WESLEA, proporcionado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos (Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers), el cual calcula las deflexiones teóricas empleando un algoritmo de Gauss-Newton modificado que permite optimizar los resultados obtenidos.

Las suposiciones básicas de la teoría elástica utilizada incluyen lo siguiente:

- ✓ Las capas de la estructura son infinitamente largas en dirección horizontal.
- ✓ Las capas poseen un espesor uniforme.
- ✓ La capa de subrasante es semi-infinita en dirección vertical.
- ✓ Las capas están compuestas por materiales homogéneos, isotrópicos, linealmente elásticos y están caracterizados por el módulo elástico y la relación de Poisson.

El programa permite trabajar hasta con 10 valores de deflexión, capturados por el mismo número de geófonos, y hasta 12 secuencias de golpes realizadas en cada estación; permitiendo evaluar una estructura de pavimento flexible que este conformada hasta por un total de cinco capas.

El proceso para la determinación del módulo da inicio con la inclusión de un valor de “módulo semilla”, con el cual el software iterativamente busca obtener el módulo final para cada capa.

Las deflexiones calculadas a partir del programa WESLEA son comparadas internamente con los valores de deflexión medidos. Cuando las diferencias entre ellos sean aceptables, habiendo sido caracterizadas por la determinación del error medio cuadrático (RMS), el cual deberá estar dentro una tolerancia usualmente estimada en 2%, ó el número de iteraciones proyectadas hayan alcanzado un límite preestablecido, el programa terminara su ejecución.

El error medio cuadrático (RMS) mencionado puede ser calculado matemáticamente a partir de la siguiente expresión:

$$RMS(\%) = \left[ \frac{1}{n_d} * \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2 \right] * 100$$

Donde:

$d_{ci}$  = Deflexión superficial del pavimento calculada en el punto del sensor  $i$ .

$d_{mi}$  = Deflexión superficial del pavimento medida con el sensor  $i$ .

$n$  = Numero de sensores usados en el proceso.

$n_d$  = Sensor en que se realiza la medición.

### **DAPS (Deflection Analysis of Pavement Structures)**

El software DAPS es un programa de retrocálculo desarrollado por la firma Abatech Consulting Engineers, el cual es usado para determinar los módulos de las capas de una estructura de pavimento con base en los valores de deflexión medidos por equipos de deflectometría de impacto.

El algoritmo de análisis para retrocálculo permite solucionar estructuras de pavimento conformadas por un máximo de tres capas, considerándolas dentro de un sistema de comportamiento elástico, en el cual se incluye el material de subrasante.

Este programa asume que debajo de la subrasante se encuentra un material muy rígido, lo que en cierta forma tiene en cuenta los efectos de la no-linealidad que son bien conocidos dentro del suelo de fundación.

Al igual que en el software EVERCALC, el DAPS compara los valores del cuenco de deflexión calculados con los valores del cuenco de deflexión medidos, por medio de un proceso iterativo, en donde cada iteración busca reducir al máximo la diferencia existente entre ambos cuencos. Cuando esto sucede, el software estima como adecuados los valores de módulo teóricos que han sido obtenidos del proceso de iteración.

Como deficiencia de este software vale la pena mencionar que la versión empleada no permite realizar la estimación de los módulos, teniendo en cuenta la corrección que debería hacerse por efectos de variación de la temperatura.

**ANEXO 8. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES MEDIDAS EN CAMPO.**

**Prueba de deflectometría 1 – calzada sur.**

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
		0	20	30	45	60	90	120	150	
Pto 1 - 11:54	9380	268.2	218.9	197.6	174.2	148.3	107.7	79.2	59.4	μm
	9160	259.1	212.3	191.8	168.7	143.8	104.6	75.7	57.4	
	9180	258.6	212.1	192.0	168.4	143.8	104.9	77.0	58.7	
Pto 2 - 11:57	9200	342.4	291.8	269.7	239.5	206.8	145.8	95.0	61.2	
	9250	335.8	287.8	266.4	237.0	204.5	146.1	95.3	62.5	
	9230	335.0	287.0	265.4	236.5	204.5	145.3	95.8	62.7	
Pto 3 - 12:00	9110	287.8	216.7	189.5	158.5	130.6	89.9	70.9	59.4	
	8980	278.9	211.3	184.4	154.7	126.2	87.6	68.8	56.6	
	8940	276.6	209.6	182.4	152.4	122.9	84.1	63.8	51.8	
Pto 4 - 12:03	9110	241.3	188.2	169.4	147.8	126.2	96.8	78.7	65.0	
	8940	234.7	183.4	164.6	145.3	124.5	96.3	77.0	64.0	
	8910	233.7	182.6	164.3	144.0	123.2	95.3	77.5	63.8	

**Prueba de deflectometría 1 – calzada norte.**

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
		0	20	30	45	60	90	120	150	
Pto 5 - 12:08	8980	377.2	308.9	280.7	241.3	201.2	138.9	98.3	74.4	μm
	8940	366.8	301.5	273.3	236.2	197.1	137.2	97.8	72.1	
	8960	367.5	302.5	275.6	237.7	198.4	137.9	98.6	74.7	
Pto 6 - 12:10	9160	275.3	216.4	196.6	171.2	145.3	104.6	75.9	56.9	
	9030	269.2	210.3	192.0	166.9	141.7	101.9	73.2	54.6	
	9130	260.6	210.6	192.0	167.4	142.7	104.1	75.9	58.4	
Pto 7 - 12:14	8890	271.5	205.5	175.8	140.0	107.7	62.0	38.4	30.0	
	8840	260.9	197.4	169.7	135.6	104.1	59.9	36.6	27.2	
	8420	258.8	196.9	168.7	135.4	103.4	59.9	37.8	28.2	
Pto 8 - 12:16	8940	266.7	204.7	173.0	136.4	103.6	58.2	36.6	26.7	
	8740	263.9	204.2	173.2	137.7	105.9	61.5	40.6	31.8	
	8890	254.5	196.6	166.9	131.6	100.6	58.2	37.1	28.2	

**Prueba de deflectometría 2 – calzada sur.**

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
		0	20	30	45	60	90	120	150	
Pto 1 - 15:05	8640	237.0	190.5	169.9	146.6	120.7	83.8	61.7	43.7	μm
	8740	255.0	204.2	181.9	157.5	133.6	96.8	72.6	57.9	
	8670	247.7	196.9	174.8	151.4	127.5	91.4	68.1	52.8	
Pto 2 - 15:08	9030	332.7	273.1	246.1	212.3	181.1	131.8	90.7	62.5	
	8860	333.5	265.4	239.3	206.8	176.3	124.0	86.4	63.5	
	8840	309.9	259.8	235.2	202.9	172.5	121.9	83.1	56.1	
Pto 3 - 15:12	9300	289.1	219.5	194.8	163.6	135.9	97.8	75.7	61.7	
	8860	284.5	214.9	190.2	160.3	132.6	95.0	72.4	58.7	
	8760	283.7	218.2	192.5	162.1	134.6	96.8	75.2	61.2	
Pto 4 - 15:15	9110	270.3	211.3	191.0	160.8	137.9	104.6	83.6	65.8	
	9130	265.7	211.8	189.2	159.0	134.6	105.7	83.3	68.3	
	9010	257.8	205.2	185.2	156.0	136.7	101.9	83.1	65.3	

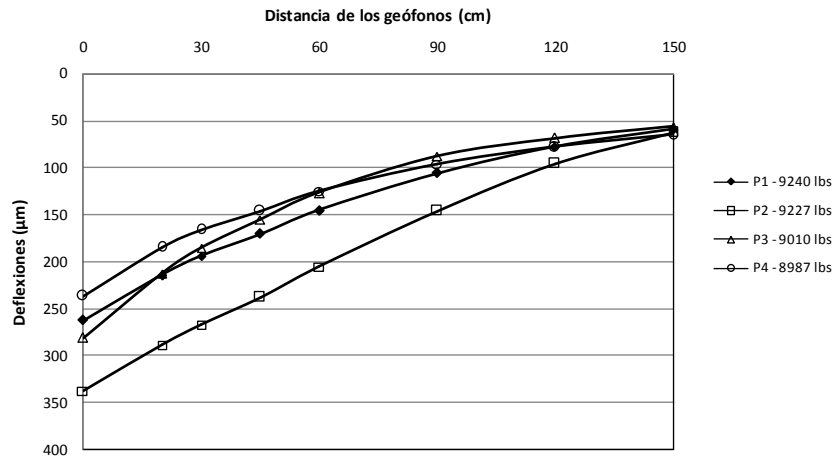
**Prueba de deflectometría 2 – calzada norte.**

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
		0	20	30	45	60	90	120	150	
Pto 5 - 15:18	8760	372.9	306.1	275.1	235.7	196.1	136.9	96.8	72.4	μm
	8810	368.0	303.5	272.8	235.0	195.8	136.7	97.5	73.9	
	8640	367.0	301.5	271.0	232.9	194.8	137.7	97.8	73.9	
Pto 6 - 15:23	8960	284.2	222.3	199.6	172.5	146.6	105.9	78.0	59.4	
	8940	281.7	218.9	195.6	169.7	144.0	104.6	75.7	57.2	
	8810	277.4	216.2	192.8	167.1	141.0	102.6	75.2	57.4	
Pto 7 - 15:27	8760	259.6	197.4	174.5	134.4	105.4	65.5	40.6	29.0	
	8570	255.3	195.1	171.2	131.8	105.7	60.2	38.4	27.7	
	8790	254.8	200.4	170.2	136.1	106.7	64.0	39.1	27.7	
Pto 8 - 15:30	9010	276.6	208.8	176.3	137.4	104.4	62.5	41.1	32.5	
	9030	276.4	206.8	173.2	135.6	102.6	60.2	38.6	30.5	
	9060	273.6	208.5	176.3	137.4	104.6	62.7	41.9	32.5	

### ANEXO 9. GENERACIÓN DE CUENCOS DE DEFLEXIÓN.

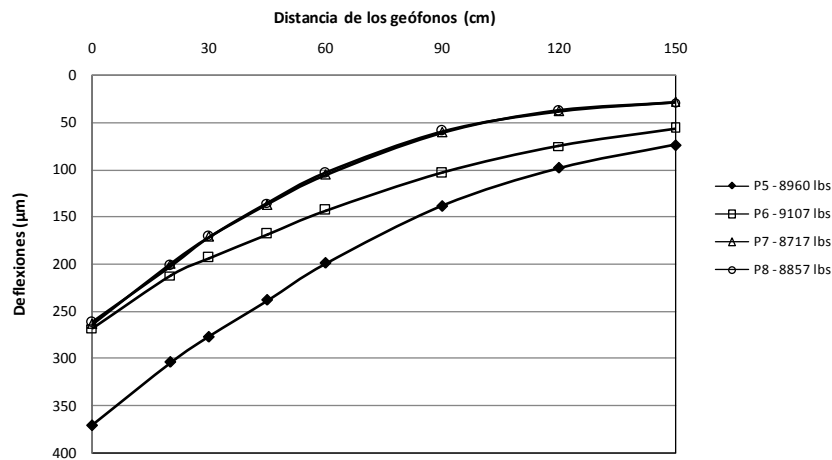
#### Prueba de deflectometría 1 – calzada sur.

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
P1	9240	262.0	214.5	193.8	170.4	145.3	105.7	77.3	58.5	μm
P2	9227	337.7	288.9	267.2	237.7	205.2	145.7	95.3	62.1	
P3	9010	281.1	212.5	185.4	155.2	126.6	87.2	67.8	56.0	
P4	8987	236.6	184.7	166.1	145.7	124.6	96.1	77.7	64.3	



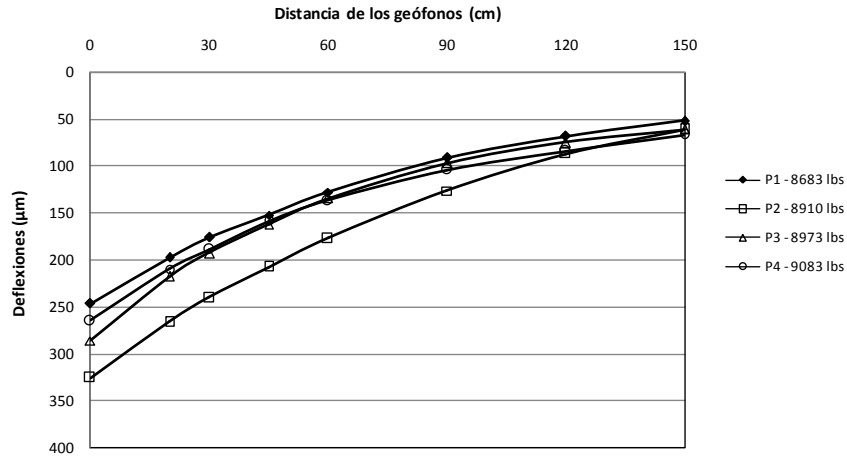
#### Prueba de deflectometría 1 – calzada norte.

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
P5	8960	370.5	304.3	276.5	238.4	198.9	138.0	98.2	73.7	μm
P6	9107	268.4	212.4	193.5	168.5	143.3	103.5	75.0	56.6	
P7	8717	263.7	199.9	171.4	137.0	105.1	60.6	37.6	28.4	
P8	8857	261.7	201.8	171.0	135.2	103.4	59.3	38.1	28.9	



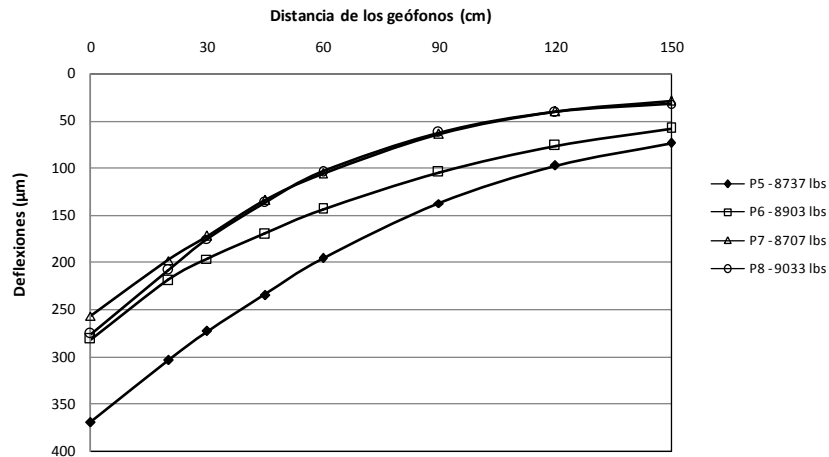
**Prueba de deflectometría 2 – calzada sur.**

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
		0	20	30	45	60	90	120	150	$\mu\text{m}$
P1	8683	246.5	197.2	175.5	151.8	127.3	90.7	67.5	51.5	$\mu\text{m}$
P2	8910	325.4	266.1	240.2	207.3	176.6	125.9	86.7	60.7	
P3	8973	285.8	217.5	192.5	162.0	134.4	96.5	74.4	60.5	
P4	9083	264.6	209.5	188.5	158.6	136.4	104.1	83.3	66.5	



**Prueba de deflectometría 2 – calzada norte.**

Punto Control	Carga (lb)	DEFLEXIONES MEDIDAS								Geófono
		1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
		0	20	30	45	60	90	120	150	$\mu\text{m}$
P5	8737	369.3	303.7	273.0	234.5	195.6	137.1	97.4	73.4	$\mu\text{m}$
P6	8903	281.1	219.1	196.0	169.8	143.8	104.4	76.3	58.0	
P7	8707	256.5	197.6	172.0	134.1	105.9	63.2	39.4	28.1	
P8	9033	275.5	208.0	175.3	136.8	103.9	61.8	40.6	31.8	



**ANEXO 10. FACTORES DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA DEFLEXIONES ALEJADAS DEL CENTRO DE APLICACIÓN DE LA CARGA, EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE LA CARPETA ASFÁLTICA.**

Según la Guía de rehabilitación del INVIAS, la FHWA propone unos factores de corrección para deflexiones alejadas 30 y 60 cm del plato de carga, tal como se aprecia a continuación.

**Factores de corrección para deflexiones a 30 cm del centro del plato de carga.**

TEMPERATURA DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS (°C)	ESPESOR DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS (cm)		
	5	10	20
	FACTOR DE CORRECCIÓN (F <sub>T</sub> )		
5	1.00 - 1.04	1.00 - 1.13	1.03 - 1.17
10	1.00 - 1.03	1.00 - 1.08	1.02 - 1.12
15	1.00 - 1.02	1.00 - 1.04	1.02 - 1.05
20	1.00	1.00	1.00
25	0.99 - 1.00	0.96 - 0.99	0.94 - 0.99
30	0.97 - 1.00	0.92 - 0.99	0.89 - 0.97

FUENTE: Guía de Rehabilitación de Pavimentos del INVIAS, 2008

**Factores de corrección para deflexiones a 60 cm del centro del plato de carga.**

TEMPERATURA DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS (°C)	ESPESOR DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS (cm)		
	5	10	20
	FACTOR DE CORRECCIÓN (F <sub>T</sub> )		
5	1.00	1.00 - 1.05	1.00 - 1.08
10	1.00	1.00 - 1.04	1.00 - 1.05
15	1.00	1.00 - 1.02	1.00 - 1.02
20	1.00	1.00	1.00
25	1.00	0.98 - 1.00	0.97 - 1.00
30	1.00	0.96 - 1.00	0.94 - 1.00

FUENTE: Guía de Rehabilitación de Pavimentos del INVIAS, 2008

Con base en la información anterior se realizó un proceso de extrapolación que permitió determinar los factores de corrección para una temperatura de capa asfáltica de 35°C, obtenida durante la jornada de pruebas No 1.

**Factores de corrección para deflexiones a 30 cm del centro del plato de carga y una temperatura de capa asfáltica de 35°C.**

Temp. capa asfáltica (°C)	Espesor capa asfáltica (cm)		
	5	10	20
	Factores de corrección		
5	1.020	1.065	1.100
10	1.015	1.040	1.070
15	1.010	1.020	1.035
20	1.000	1.000	1.000
25	0.995	0.975	0.965
30	0.985	0.955	0.930
<b>35 *</b>	<b>0,980 *</b>	<b>0,932 *</b>	<b>0,895 *</b>

*\* Valores Estimados*

**Factores de corrección para deflexiones a 60 cm del centro del plato de carga y una temperatura de capa asfáltica de 35°C.**

Temp. capa asfáltica (°C)	Espesor capa asfáltica (cm)		
	5	10	20
	Factores de corrección		
5	1.000	1.025	1.040
10	1.000	1.020	1.025
15	1.000	1.010	1.010
20	1.000	1.000	1.000
25	1.000	0.990	0.985
30	1.000	0.980	0.970
<b>35 *</b>	<b>1,000 *</b>	<b>0,970 *</b>	<b>0,959 *</b>

*\* Valores Estimados*

Con los resultados mostrados en las dos tablas anteriores, se procedió a estimar los coeficientes ajustados a un espesor de capa asfáltica de 24 cm, para distancias de separación de geófonos de 30 y 60 cm; teniendo presente las temperaturas de capa asfáltica de 30 y 35°C a las que se realizaron las deflectometrías.

**Factores de corrección para una temperatura de la capa asfáltica de 30 y 35°C, y un espesor de 24 cm.**

Temp. Pavimento	30° C		35° C	
	30	60	30	60
Dist. Geófono (cm)				
Espeor capa asfáltica (cm)	Factores de corrección		Factores de corrección	
5	0.985	1.000	0.980	1.000
10	0.955	0.980	0.932	0.970
20	0.930	0.970	0.895	0.959
<b>24 *</b>	<b>0,924 *</b>	<b>0,964 *</b>	<b>0,883 *</b>	<b>0,949 *</b>

*\* Valores Estimados*

Para completar los coeficientes requeridos se procede a extrapolar los resultados anteriores para separaciones de geófonos de 20 y 45 cm; los cuales se presentan a continuación.

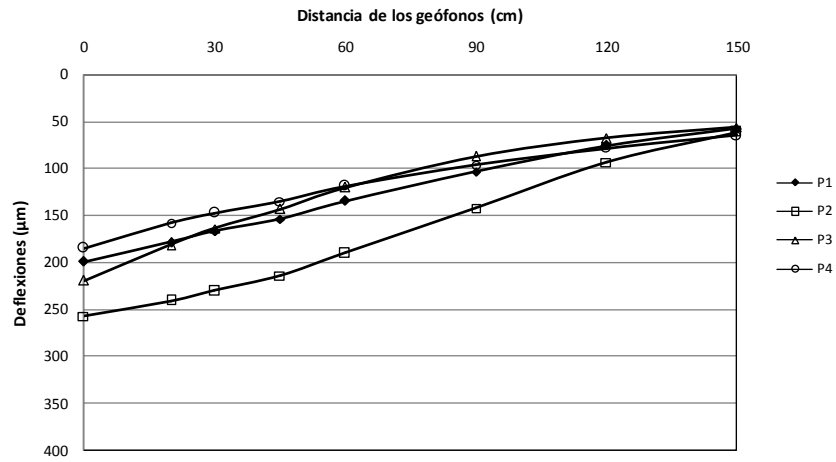
Temp. Pavimento (° C)	Distancia al Centro del Plato de Carga (cm)				
	0	20	30	45	60
	Coeficientes de corrección por temperatura				
30	0.840	<b>0,902 *</b>	0.924	<b>0,957 *</b>	0.964
35	0.780	<b>0,854 *</b>	0.883	<b>0,924 *</b>	0.949

*\* Valores Estimados*

**ANEXO 11. DEFLEXIONES CORREGIDAS POR CARGA Y TEMPERATURA.**

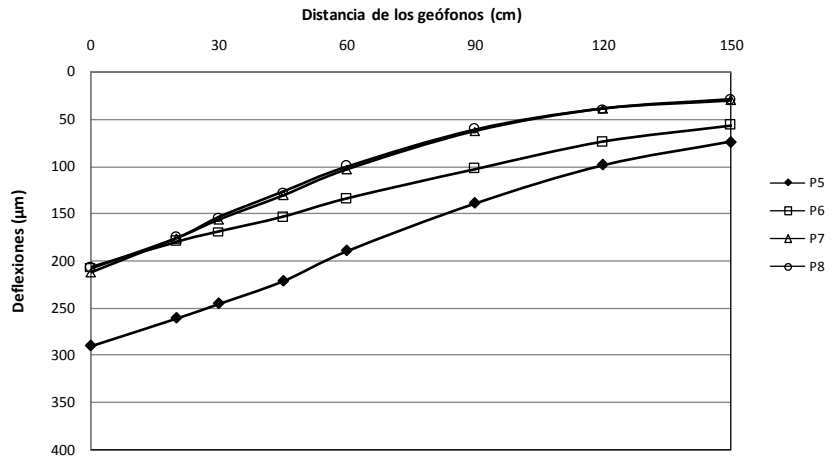
**Prueba de deflectometría 1 – calzada sur.**

Punto Control	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Geófono Dist. (cm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
P1	199.0	178.4	166.7	153.4	134.3	103.0	75.3	57.0	μm
P2	257.0	240.6	230.2	214.2	190.0	142.1	93.0	60.6	
P3	219.0	181.3	163.6	143.2	120.0	87.1	67.7	55.9	
P4	184.8	158.0	147.0	134.8	118.5	96.2	77.8	64.4	



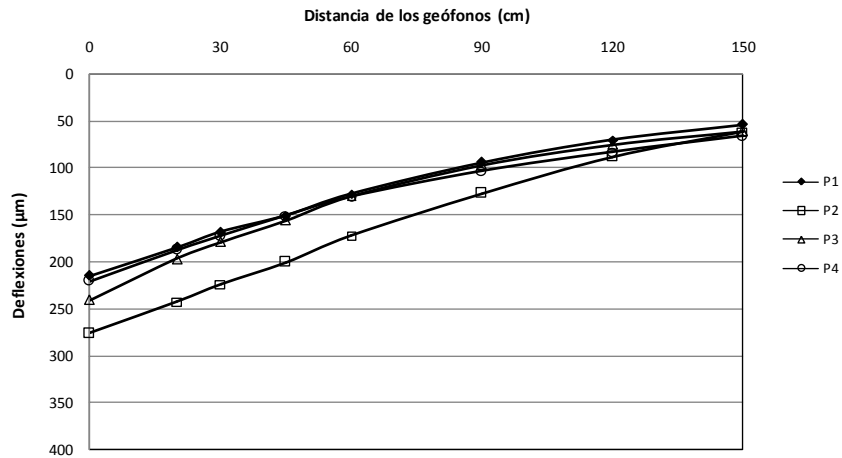
**Prueba de deflectometría 1 – calzada norte.**

Punto Control	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Geófono Dist. (cm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
P5	290.3	261.0	245.3	221.3	189.6	138.6	98.7	74.1	μm
P6	206.9	179.3	169.0	153.9	134.4	102.3	74.1	56.0	
P7	212.4	176.3	156.3	130.7	103.0	62.6	38.8	29.4	
P8	207.4	175.2	153.5	127.0	99.7	60.2	38.7	29.3	



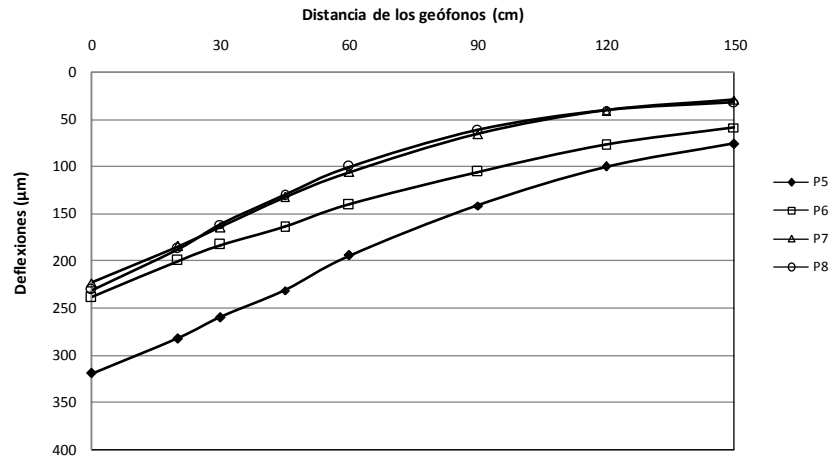
**Prueba de deflectometría 2 – calzada sur.**

Punto Control	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Geófono
	1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
P1	214.7	184.4	168.0	150.6	127.2	94.0	69.9	53.4	μm
P2	276.1	242.5	224.1	200.4	172.1	127.2	87.6	61.3	
P3	240.7	196.8	178.4	155.5	130.0	96.8	74.6	60.7	
P4	220.2	187.2	172.5	150.4	130.3	103.1	82.5	65.9	



**Prueba de deflectometría 2 – calzada norte.**

Punto Control	DEFLEXIONES CORREGIDAS								Geófono
	1	2	3	4	5	6	7	8	Dist. (cm)
P5	319.6	282.2	259.7	231.2	194.3	141.2	100.3	75.6	μm
P6	238.7	199.8	183.0	164.2	140.2	105.5	77.1	58.6	
P7	222.8	184.3	164.2	132.7	105.6	65.4	40.7	29.1	
P8	230.6	186.9	161.3	130.5	99.8	61.6	40.4	31.7	



## ANEXO 12. RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL DE BASE GRANULAR.

### Resultados de granulometría

Base Granular Tipo BG-A

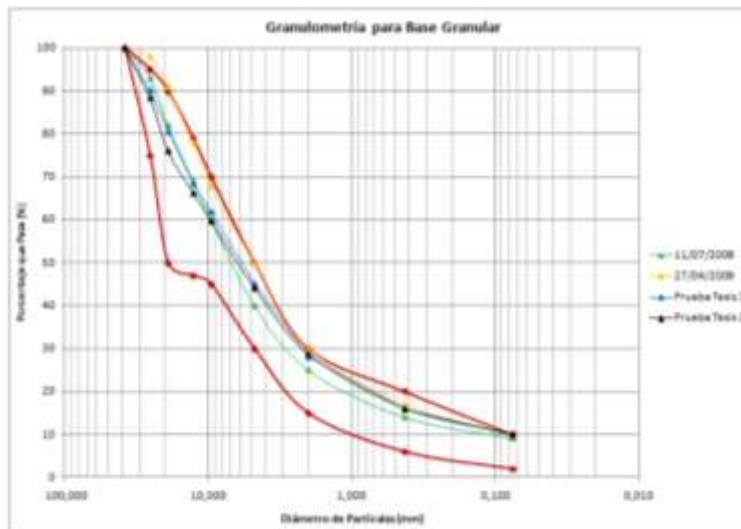
Procedencia del Material: Cantera Carmen de Carupa

Análisis Granulométrico

Tamiz (Pulg)	Tamiz (mm)	Especificación (% Pasa)	Especificación (% Pasa)	11/07/2009 (% Pasa)	27/04/2009 (% Pasa)	Prueba Tesis 1 (% Pasa)	Prueba Tesis 2 (% Pasa)
1 1/2"	38,100	100	100	100	100	100,00	100,00
1"	25,400	75	95	93	98	90,20	88,40
3/4"	19,050	50	90	82	91	80,51	76,08
1/2"	12,700	47	79	69	78	68,28	66,19
3/8"	9,525	45	70	60	68	61,87	59,66
No 4	4,750	30	50	40	50	45,09	44,14
No 10	2,000	15	30	25	30	28,07	28,76
No 40	0,425	6	20	14	17	15,89	15,99
No 200	0,075	2	10	9,1	9,7	9,88	9,97
Fondo						0,00	0,00

Las gradaciones denominadas 11/07/2009 y 27/04/2009 fueron tamizadas por el laboratorio E.I.E., y las dos restantes en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional.

### Curvas granulométricas de las muestras ensayadas.



En color rojo se presentan los límites inferior y superior permitidos que conforman la banda granulométrica establecida para el material de base granular tipo BG-A.

**Resumen de resultados de clasificación y límites.**

MATERIAL	REFERENCIA	PORCENTAJES			Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad	Humedad Natural (%)	CLASIFICACIÓN	
		Grava	Arena	Finos					AASHTO	USCS
BASE GRANULAR	11/07/2009	-	-	-	NLL	NLP	NP	-	A-1-a	GP-GM
	27/04/2009	-	-	-	NLL	NLP	NP	-	A-1-a	GP-GM
BASE GRANULAR	Prueba Tesis 1	54,9	35,2	9,9	NLL	NLP	NP	4,85	A-1-a	GM
	Prueba Tesis 2	55,8	34,2	10,0	NLL	NLP	NP	4,98	A-1-a	GM

Un resumen de los resultados de laboratorio encontrados a la luz de los requisitos de calidad exigidos por el IDU se relacionan en la siguiente tabla.

**Requisitos de calidad establecidos para el material de base granular tipo BG-A.**

ENSAYO		ESPECIFICACIÓN IDU	RESULTADOS DE LABORATORIO
<b>DUREZA</b>			
Desgaste en Máquina de los Angeles (Gradación A)	En seco, 500 Rev.	30% Máx.	27%
	En seco, 100 Rev.	6% Máx.	6%
	48 Horas Inmersión, 500 Rev.	45% Máx.	34%
	Relación húmedo/seco, 500 Rev.	2% Máx.	-
Micro Deval	Agregado Grueso	20% Máx.	16,10%
10% de Finos	Valor en seco	100 KN Mín.	173,1 KN
	relación húmedo/seco	75% Mín.	77%
<b>DURABILIDAD</b>			
Solidez en Sulfatos	Sulfato de Magnesio	18% Máx.	9,30%
<b>LIMPIEZA</b>			
Límite Líquido		25% Máx.	NL
Índice de Plasticidad		No Plástico	NP
Equivalente de Arena		25% Mín.	21 - 23%
Azul de Metileno		8 Máx.	7
Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables		2% Máx.	0,16%
<b>GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS</b>			
Partículas Fracturadas Mecánicamente	1 cara	85% Mín.	98%
	2 caras	60% Mín.	92%
Índice de Aplanamiento		35% Máx.	27%
Índice de Alargamiento		35% Máx.	18%
Angularidad del Agregado Fino		35% Mín.	-
<b>CAPACIDAD DE SOPORTE</b>			
CBR. Referido al 100% de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142, método D, después de 4 días de inmersión		100% Mín.	106%

### ANEXO 13. RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL DE SUBBASE GRANULAR.

#### Resultados de granulometría.

SubBase Granular Tipo SBG-A

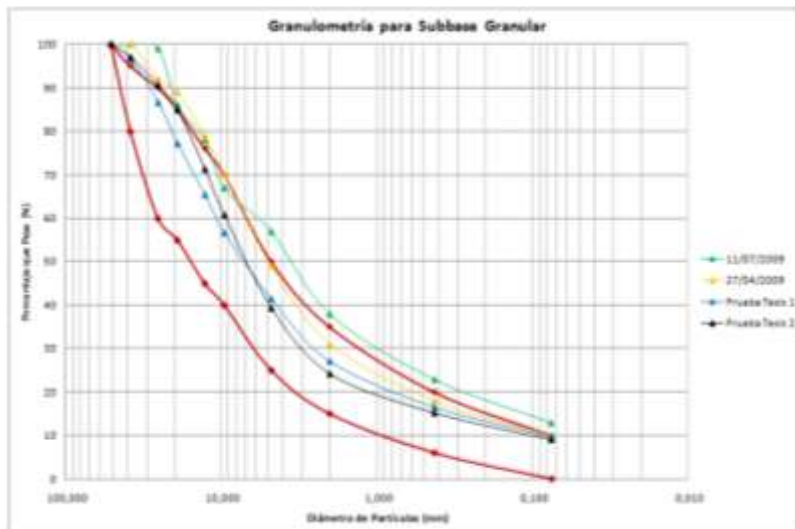
Procedencia del Material: Cantera Carmen de Carupa

Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamiz	Especificación (% Pasa)	Especificación (% Pasa)	11/07/2009 % Pasa	27/04/2009 % Pasa	Prueba Tesis 1 % Pasa	Prueba Tesis 2 % Pasa
2"	50,800	100	100	100	100	100,00	100,00
1 1/2"	38,100	80	95	100	100	96,57	97,03
1"	25,400	60	90	99	92	86,59	90,58
3/4"	19,050	55	85	86	89	77,18	84,89
1/2"	12,700	45	76	78	79	65,34	71,24
3/8"	9,525	40	70	67	70	56,65	60,69
No 4	4,750	25	50	57	49	41,46	39,33
No 10	2,000	15	35	38	31	27,08	24,21
No 40	0,425	6	20	23	18	16,53	15,19
No 200	0,075	0	10	13	10	9,77	9,03
Fondo						0,00	0,00

Las gradaciones denominadas 11/07/2009 y 27/04/2009 fueron tamizadas por el laboratorio E.I.E., y las dos restantes en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional.

#### Curvas granulométricas de las muestras ensayadas.



**Resumen de resultados de clasificación y límites.**

MATERIAL	REFERENCIA	PORCENTAJES			Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad	Humedad Natural (%)	CLASIFICACIÓN	
		Grava	Arena	Finos					AASHTO	USCS
SUBBASE GRANULAR	11/07/2009	-	-	-	NLL	NLP	NP	-	A-1-a	SM
	27/04/2009	-	-	-	21	17,8	3,2	-	A-1-a	GP-GM
SUBBASE GRANULAR	Prueba Tesis 1	58,5	31,7	9,8	19,7	15,7	4,0	7,66	A-1-a	CL-ML
	Prueba Tesis 2	60,7	30,3	9,1	20,5	16,8	3,7	7,35	A-1-a	GM

Un resumen de los resultados de laboratorio encontrados a la luz de los requisitos de calidad exigidos por el IDU se relacionan en la siguiente tabla.

**Requisitos de calidad establecidos para el material de subbase granular tipo SBG-A.**

ENSAYO		ESPECIFICACIÓN IDU	RESULTADOS DE LABORATORIO
<b>DUREZA</b>			
Desgaste en Máquina de los Angeles (Gradación A)	En seco, 500 Rev.	35% Máx.	24%
	En seco, 100 Rev.	7% Máx.	5%
	48 Horas Inmersión, 500 Rev.	55% Máx.	36%
	Relación húmedo/seco, 500 Rev.	2% Máx.	-
Micro Deval	Agregado Grueso	30% Máx.	17,80%
10% de Finos	Valor en seco	60 KN Mín.	224,6 KN
	relación húmedo/seco	75% Mín.	77,70%
<b>DURABILIDAD</b>			
Solidez en Sulfatos	Sulfato de Magnesio	18% Máx.	11%
<b>LIMPIEZA</b>			
Límite Líquido		25% Máx.	20 - 21%
Índice de Plasticidad		3% Máx.	3,0 - 4,3%
Equivalente de Arena		20% Mín.	21 - 31%
Azul de Metileno		10 Máx.	7,0 - 8,8
Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables		2% Máx.	0,08%
<b>GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS</b>			
Partículas Fracturadas Mecánicamente	1 cara	50% Mín.	100%
	2 caras	30% Mín.	100%
Índice de Aplanamiento		NA	-
Índice de Alargamiento		NA	-
Angularidad del Agregado Fino		NA	-
<b>CAPACIDAD DE SOPORTE</b>			
CBR. Referido al 95% de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142, método D, después de 4 días de inmersión		60% Mín.	82%

## ANEXO 14. RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL GRANULAR TIPO B-600.

### Resultados de granulometría

Material Granular Tipo B-600

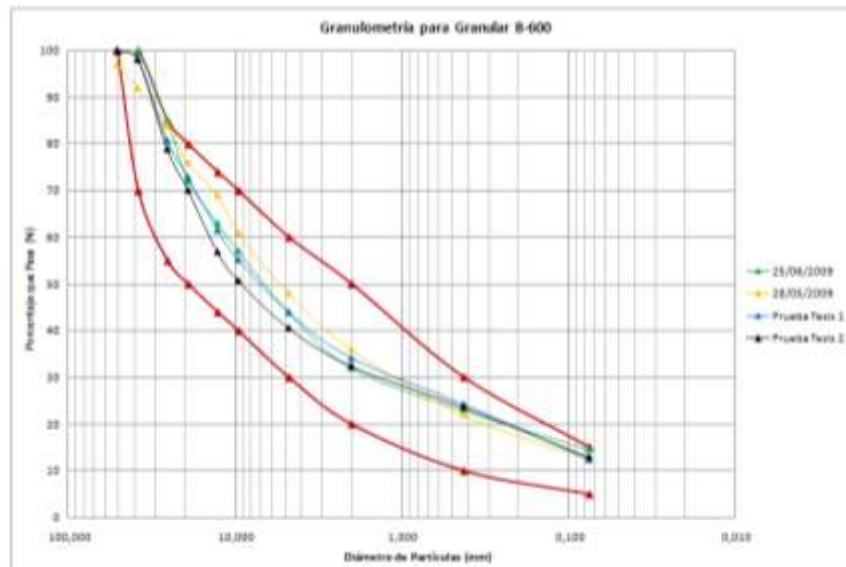
Procedencia del Material: Cantera Vista Hermosa

Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamiz	Especificación (% Pasa)	Especificación (% Pasa)	25/06/2009 % Pasa	28/05/2009 % Pasa	Prueba Tesis 1 % Pasa	Prueba Tesis 2 % Pasa
2"	50,800	100	100	100	97	100,00	100,00
1 1/2"	38,100	70	100	100	92	98,20	98,06
1"	25,400	55	85	85	84	80,70	78,88
3/4"	19,050	50	80	72	76	72,85	70,05
1/2"	12,700	44	74	63	69	61,55	56,86
3/8"	9,525	40	70	57	61	55,21	50,71
No 4	4,750	30	60	44	48	43,92	40,56
No 10	2,000	20	50	32	36	34,12	32,44
No 40	0,425	10	30	23	22	24,22	23,67
No 200	0,075	5	15	15	13	12,32	12,97
Fondo						0,00	0,00

Las gradaciones denominadas 25/05/2009 y 28/04/2009 fueron tamizadas por el laboratorio E.I.E., y las dos restantes en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional.

### Curvas granulométricas de las muestras ensayadas.



**Resumen de resultados de clasificación y límites.**

MATERIAL	REFERENCIA	PORCENTAJES			Limite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Indice de Plasticidad	Humedad Natural (%)	CLASIFICACIÓN	
		Grava	Arena	Finos					AASHTO	USCS
GRANULAR B600	25/06/2009	-	-	-	NLL	NLP	NP	-	A-1-a	GM
	28/05/2009	-	-	-	NLL	NLP	NP	-	A-1-a	GM
GRANULAR B600	Prueba Tesis 1	56,1	31,6	12,3	21,4	15,8	5,6	5,19	A-1-a	CL-ML
	Prueba Tesis 2	59,4	27,6	13,0	20,8	15,4	5,5	4,55	A-1-a	CL-ML

Un resumen de los resultados de laboratorio encontrados a la luz de los requisitos de calidad exigidos por el IDU se relacionan en la siguiente tabla.

**Requisitos de calidad establecidos para el material granular de mejoramiento tipo B-600.**

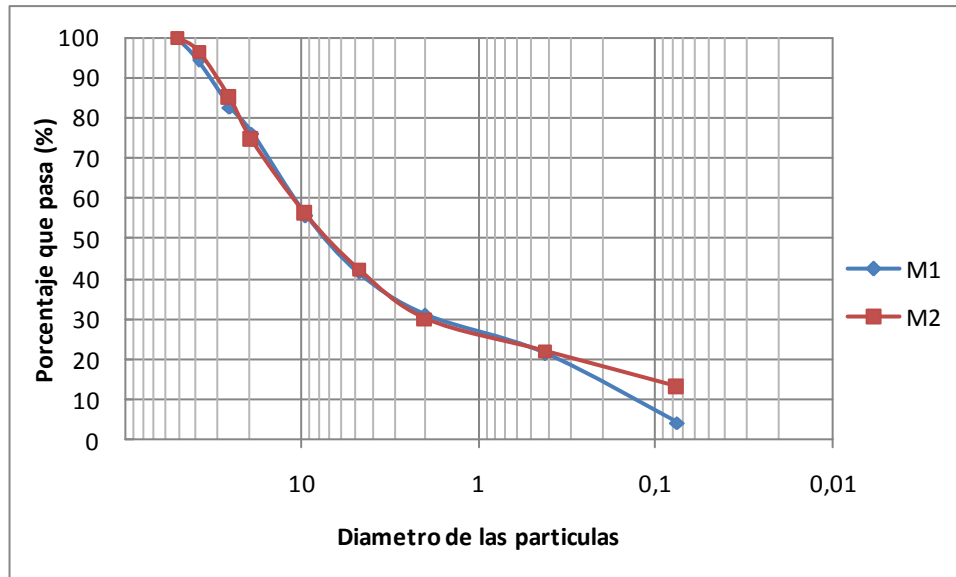
ENSAYO		ESPECIFICACIÓN IDU	RESULTADOS DE LABORATORIO
<b>DUREZA</b>			
Desgaste en Máquina de los Angeles	En seco, 500 Rev.	35% Máx.	34 - 60%
	En seco, 100 Rev.	N.A.	16%
	48 Horas Inmersión, 500 Rev.	55% Máx.	-
<b>DURABILIDAD</b>			
Solidez en Sulfatos	Sulfato de Magnesio	12% Máx.	9 - 12,3%
<b>LIMPIEZA</b>			
Límite Líquido		25% Máx.	20,8 - 21,4%
Indice de Plasticidad		3% Máx.	5,5 - 5,6%
Equivalente de Arena		20% Mín.	14 - 17%
<b>GEOMETRIA DE LAS PARTÍCULAS</b>			
Partículas Fracturadas Mecánicamente	1 cara	50% Mín.	100%
	2 caras	50% Mín.	94%
Indice de Aplanamiento		35% Máx.	18%
Indice de Alargamiento		35% Máx.	8%
<b>CAPACIDAD DE SOPORTE</b>			
CBR. Referido al 95% de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142, método D, después de 4 días de inmersión		60% Mín.	80%

**ANEXO 15. RESULTADOS DE CARACTERIZACION FISICA BASICA DE LA SUBRASANTE REMANENTE**

**Resultados de granulometría**

Tamiz (Pulg)	Tamiz (mm)	AP 18 -m1 (%pasa)	AP 19 -m2 (%pasa)
2"	50,8	100	100
1 1/2"	38,1	94,2	96,5
1"	25,4	82,6	84,9
3/4"	19,05	76,2	74,3
3/8"	9,525	55,7	56,1
No 4	4,75	41,6	42,4
No 10	2	30,9	30
No 40	0,425	21,5	22,1
No 200	0,075	4,2	13,1
Fondo			

**Curvas granulométricas de las muestras ensayadas.**



**Resumen de resultados de clasificación y límites.**

MATERIAL	REFERENCIA	PORCENTAJES			Limite Líquido (%)	Limite Plástico (%)	Indice de plasticidad	Humedad natural (%)	CLASIFICACION	
		Gravas	Arenas	Finos					AASHTO	USCS
Subrasante remanente	M1	58,4	37,36	4,24	NL	NP	NP	5,7	A-1a	GP
Subrasante remanente	M2	57,63	29,24	13,13	20,35	14,35	6	5,2	A-1a	GM-GC

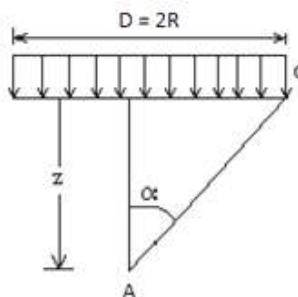
## ANEXO 16. DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE ESFUERZOS PARA LA CAPA GRANULAR Y DE SUBRASANTE.

Los parámetros presentados en la tabla 24 fueron obtenidos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El esfuerzo vertical se determinó a partir de la relación entre la densidad promedio de los materiales que conformaban cada capa y el espesor de la misma, expresada en kilopascales (kpa).
2. Sobre la carpeta asfáltica no se desarrolla el cálculo de la invariante de esfuerzos, debido a que en esta capa el módulo se determina en función de los resultados obtenidos en laboratorio según el ensayo de módulo dinámico a una temperatura de la mezcla de 20°C.
3. El valor del coeficiente de presión en reposo  $K_0$ , se adoptó para cada uno de los materiales como la relación entre  $\mu/(1-\mu)$ , donde la relación de Poisson  $\mu$ , se asumió para la carpeta asfáltica, el material granular y la subrasante como 0,35, 0,40 y 0,45 respectivamente; de tal forma que existiera concordancia entre éstos y los valores asumidos para ser usados en la determinación de los módulos utilizando los software de retrocálculo.
4. El esfuerzo horizontal se determinó con base en la relación entre el esfuerzo vertical y el coeficiente de presión en reposo  $K_0$ , así:  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ .
5. El incremento de esfuerzo vertical  $\Delta\sigma_v$ , se determinó a partir del efecto que ocasiona la carga del eje de diseño de 8,2 ton sobre la estructura de pavimento, el cual equivale a una presión uniformemente distribuida de 0,56 MPa sobre un área circular de 15,27cm de radio.

Este incremento de esfuerzos fue solucionado por Boussinesq por medio de la expresión mostrada en el siguiente esquema.

### Solución de Boussinesq para la determinación del incremento de esfuerzo vertical bajo un área de contacto circular.

$$\Delta\sigma_z = q \left[ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{R}{z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right]$$


El diagrama ilustra un área de contacto circular de diámetro  $D = 2R$  y radio  $R$ , sometida a una carga uniformemente distribuida  $q$ . Se muestra la profundidad  $z$  y el ángulo  $\alpha$  en la solución de Boussinesq.

Fuente: Das, 1999.

- Donde:
- $\Delta\sigma_z$  : Incremento de esfuerzo vertical ( $\Delta\sigma_v$ ).
  - $q$  : Presión de contacto sobre la superficie del pavimento.
  - $R$  : Radio del área de carga circular.
  - $Z$  : Profundidad a la cual se determina el incremento de esfuerzo vertical.

6. La invariante de esfuerzos  $\theta$  requerida para la determinación del módulo de la capa granular y de subrasante, se obtiene de la suma del incremento de esfuerzo vertical  $\Delta\sigma_v$ , más tres veces el valor del esfuerzo horizontal; una relación que se asemeja a la empleada en el ensayo de módulo resiliente, la cual es igual a la suma del esfuerzo desviador aplicado más tres veces la presión de confinamiento del material ( $\sigma_d + 3\sigma_c$ ).