PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE RIGIDEZ EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, DETERMINADO MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO Y OBTENIDOS CON INSTRUMENTACIÓN DE TERRENO

GONZALO RODRIGO SANDOVAL PALMA

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

Santiago de Chile, Diciembre, 2010

© 2010, Gonzalo Rodrigo Sandoval Palma

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DEL MODULO DE RIGIDEZ EN MEZCLAS ASFALTICAS, DETERMINADO MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO Y OBTENIDOS CON INSTRUMENTACION DE TERRENO

GONZALO RODRIGO SANDOVAL PALMA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores :

GUILLERMO THENOUX ZEBALLOS

MAURICIO LOPEZ CASANOVA

VICTOR ROCO HERRERA

CARLOS BONILLA MELENDEZ

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre, 2010

A mis Padres

A mi esposa y a mi hijo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios.

A mis colegas y amigos, que de una u otra forma han contribuido a que pueda desarrollar esta tarea.

Al personal del Laboratorio Nacional de Vialidad, en especial a toda el área de Asfalto, quienes han sido parte fundamental del desarrollo de esta Tesis.

En forma especial quisiera agradecer al Ingeniero Jefe del Laboratorio Nacional de Vialidad, Don Victor Roco Herrera, ya que desde el primer momento me brindó todo su apoyo para poder realizar este estudio.

Agradezco también al personal y compañeros de la Universidad, a los integrantes del Centro de Ingeniería e Investigación Vial, en especial a Marcelo Gonzalez, y a mi profesor Guía, don Guillermo Thenoux Zeballos, por haberme recibido como estudiante, y haber confiado en mis capacidades.

Finalmente, quisiera agradecer a mi familia, mi esposa e hijo, y muy especialmente a mis Padres, quienes siempre han estado presentes para apoyarme. Sólo me queda decirles: Todo lo bueno que he logrado en mi vida se los debo a ustedes.

Gracias a Todos

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INDICE DE TABLAS vii

INDICE DE FIGURAS ix

RESUMEN xi

ABSTRACT xiii

CAPITULO I: INTRODUCCION 1

1.1. Origen de la Idea de Estudio 1

1.2. Antecedentes Generales 1

1.2.1. Módulo Complejo, Módulo Resiliente y Módulo de Rigidez 4

1.3. Descripción del Problema 12

1.4. Hipótesis 13

1.5. Objetivos 14

1.6. Metodología de Investigación 14

1.7. Alcances de la Investigación 17

1.8. Estructura de la Tesis 18

CAPITULO II: LABORATORIO 21

2.1. Métodos de Ensayo 21

2.1.1.Equipos de Laboratorio 291

2.1.2.Estudios de Medición de Módulo 24

2.1.3.Normativas de Ensayo 24

2.1.4.Descripción del ensayo determinación del módulo de rigidez 27

2.1.5. Procedimiento para medición de modulo con equipo N.A.T. 29

2.1.6. Cálculo de módulo de rigidez 31

2.2. Implementación del Ensayo 33

2.2.1. Infraestructura y equipos 33

2.2.2. Acondicionamiento del equipo 33

2.2.3. Fabricación de Probetas 33
2.2.3. Testigos de pavimento 335
2.2.3. Evaluación de precisión del ensayo 35
2.2.6. Repetibilidad 36
2.2.7. Criterios de aceptación de resultados 38
2.3. Metodología Experimental 42
2.3.1. Diseño experimental 42
2.3.2. Variables del diseño 42
2.3.3. Metodología de fabricación y análisis de probetas 43
2.4. Resultados 44
2.4.1. Probetas Marshall 44
2.4.2. Testigos de pavimento 447
2.5. Análisis de datos 50
2.5.1. Variabilidad 50
2.5.2. Análisis de Módulo según grado de compactación 52
2.5.3. Contrastación resultados con Método Mecanicista 54
2.5.4. Análisis Módulo v/s Temperatura 58

CAPITULO III: MEDICION EN TERRENO 60
3.1. Métodos de Ensayo 60
3.1.1. Estudios de Instrumentación de Pavimento 673
3.1.2. Normativas 73
3.1.3. Descripción del ensayo 73
3.2. Implementación del Ensayo 74
3.2.1. Infraestructura 74
3.2.2. Acondicionamiento del Equipo 76
3.3. Metodología Experimental 76
3.3.1. Diseño Experimental 76
3.3.2. Variables del diseño 77
3.3.3. Metodología de toma de datos 77
3.4. Resultados 78
3.5. Análisis de datos 780

CAPITULO IV: CONCLUSIONES 82
4.1. Conclusiones 82
4.2. Recomendaciones 84

4.3. Futuras Líneas de Investigación 86

BIBLIOGRAFIA.....87

ANEXOS.....89

ANEXO 1: DETERMINACION DEL MODULO RESILIENTE MEDIANTE NORMA ASTM 90

ANEXO 2: DETERMINACION DEL MODULO DE RESILIENTE MEDIANTE NORMA AASHTO 93

ANEXO 3: STRAIN GAGES.....96

ANEXO 4: TIPOS DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS.....110

ANEXO 5 :DEFLECTOMETRO DE IMPACTO.....121

ANEXO 6: PROTOCOLO DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS 128

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.1. Mezclas consideradas en la etapa de Laboratorio 17
Tabla 2.1. Comparación entre métodos para medición de módulo 25
Tabla 2.2. Resultados prueba de repetibilidad (Valores en MPa) 38
Tabla 2.3. Análisis estadístico de resultados 38
Tabla 2.4. Análisis de resultados de ensayos a celda patrón 40
Tabla 2.5. Matriz factorial 42
Tabla 2.6. Determinación de módulo a Testigos de Pavimento Ruta G-78 (Edad:10 Días) 47
Tabla 2.7.Determinación de módulo a Probetas de Laboratorio Ruta G-78 (Edad:10 Días) 48
Tabla 2.8.Granulometría de la muestra 50
Tabla 2.9. Módulo de rigidez de testigos extraídos 50
Tabla 2.10. Análisis de variabilidad en módulos para el total de mezclas estudiadas 51
Tabla 2.11. Análisis de variabilidad en módulos para mezclas estudiadas, exceptuando la mezcla n° 2 52
Tabla 2.12. Determinación teórica del módulo de Rigidez de dos Cementos Asfalticos, basado en Nomograma de Van der Poel 57
Tabla 2.13. Determinación teórica del módulo de la mezcla asfáltica para cada Cemento Asfáltico, utilizando Gráfica de Heukelom 57
Tabla 2.14. Módulo de Rigidez a 15°C y a 25°C para probetas fabricadas en laboratorio de contrato Ruta G-78. (Probetas recién fabricadas) 58
Tabla 2.15. Módulo de Rigidez a 15°C y a 25°C para probetas fabricadas en laboratorio (Mezcla n° 3) después de más de 500 días de fabricadas 58
Tabla 2.16. Módulo de Rigidez a 15°C y a 25°C para testigos de Pavimento Vicuña Mackenna- Santa Isabel (Edad aproximada pavimento: 20 años) 59
Tabla 3.1. Equipos a utilizar en el estudio 60
Tabla 3.2. Diseño experimental de terreno 76
Tabla 3.3. Resultados de Deflectometría de impacto e Instrumentación 80

Tabla 3.4. Cálculo de Coeficiente de Poisson de acuerdo a mediciones realizadas con FWD y con HPAST 2 81

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1. Ensayo de módulo por carga indirecta.....3
Figura 1.2. Representación gráfica del módulo complejo.....5
Figura 1.3. Forma del pulso de carga Haversine, y deformaciones total e instantánea en mezclas asfálticas. (Fuente: AASHTO TP31).....8
Figura 1.4. Representación gráfica de la deformación de la mezcla asfáltica ante un pulso de carga considerada por cada método.....10
Figura 1.5. Representación gráfica de la deformación de la mezcla asfáltica ante un pulso de carga, a baja temperatura (Comportamiento elástico).....11
Figura 1.6. Diagrama de Flujo de las actividades realizadas en la investigación 16
Figura 2.1.Marco de carga del equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). 22
Figura 2.2. Probeta en el submarco de carga durante ensayo indirecto por carga diametral.22
Figura 2.3. Sistema de adquisición de datos utilizado en la investigación 23
Figura 2.4. Transductores LVDT para medición de deformación por carga diametral. 23
Figura 2.5. Cámara Térmica del equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) 23
Figura 2.6. Forma del pulso de carga y Factor de área de carga.....28
Figura 2.7. Datos de entrada para ensayo, utilizando Software de equipo NAT 29
Figura 2.8. Alineación de altura del submarco de carga para colocación de LVDT 30
Figura 2.9. Cálculo de módulo de Rigidez con software de equipo NAT 32
Figura 2.10. Sistema Compactación Marshall 34
Figura 2.11. Celda patrón utilizada para determinar repetibilidad del ensayo.....37
Figura 2.12. Resultados de mediciones de Módulo de Rigidez a probetas de laboratorio con método EN 12697-26 (2003), Anexo C 44
Figura 2.13. Resultados de mediciones de módulo de rigidez a probetas de laboratorio con método EN 12697-26 (2003), Anexo C, Ordenados por tipo de muestras 45
Figura 2.14. Resultados promedio de mediciones de módulo a probetas con método EN 12697-26 (2003), Anexo C. 46
Figura 2.15. Trozo de pavimento Avenida Vicuña Mackenna 49

Figura 2.16. Comparación de evolución del módulo de Rigidez para probetas con distintos grados de compactación 53
Figura 2.17. Comparación de módulo de Rigidez para probetas con distintos grados de compactación (Acercamiento).....53
Figura 2.18. Nomograma de Van der Poel.....55
Figura 2.19. Gráfica de Heukelom para determinar el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica.....56
Figura 3.1. Strain Gage utilizado en el estudio y diagrama de capas que lo componen 62
Figura 3.2. Diagrama de conexión de los cables del Strain Gage para su lectura con datalogger.....63
Figura 3.3. Datalogger utilizado para la investigación.....64
Figura 3.4. Diagrama de conexión del Strain Gage con el adaptador para cable RJ50 64
Figura 3.5. Balanza para Pesaje móvil considerada para el estudio.....65
Figura 3.6. Medición de deflectometría en el tramo de prueba con equipo FWD.....66
Figura 3.7. Mn Road Test 68
Figura 3.8. Layout del Mn Road Test 68
Figura 3.9. Ubicación del Virginia Smart Road Test.....69
Figura 3.10. Simulación de condición de Lluvia 70
Figura 3.11. CEDEX en España.....71
Figura 3.12. HVS en Sudáfrica 72
Figura 3.13. CAPTIF, Nueva Zelanda 72
Figura 3.14. Estructura del tramo de prueba del estudio.....74
Figura 3.15. Construcción del tramo de prueba 75
Figura 3.16. Ubicación de los Strain Gages en el tramo de prueba 75
Figura 3.17. Medición de cuatro pulsos de carga aplicados por el FWD en el pavimento sobre un Strain Gage 78
Figura 3.18 Determinación deformación máxima y mínima debida a pulso de carga.....79

RESUMEN

La presente investigación busca conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, desde el punto de vista de la evolución del módulo de rigidez en el tiempo. El módulo se utiliza en el diseño estructural de pavimentos, por lo tanto es de suma importancia determinar si este valor varía en el tiempo. De ser así se deberá considerar para efectos de diseño un módulo a corto plazo y otro para consideraciones en el diseño a largo plazo. Para comprobar esta hipótesis, se fabricaron probetas de distintas mezclas asfálticas en caliente, y se les midió módulo periódicamente durante dos años. El método de ensayo seleccionado es de acuerdo a la normativa Europea, ya que es el método más simple, rápido, y que menos posibilidades de dañar a la probeta estudiada presenta, dentro de los métodos considerados. La temperatura de ensayo seleccionada es 15°C, para asegurar un comportamiento elástico.

Por otro lado, se instrumentó un pavimento, con el fin de determinar su comportamiento in situ, y establecer de manera preliminar si es posible obtener un valor de módulo que sea comparable al obtenido en laboratorio.

De la experiencia en laboratorio se puede concluir que efectivamente el módulo de una mezcla asfáltica varía en el tiempo, y luego de dos años tiende a un valor que se encuentra entre 8.000MPa y 10.000MPa, para mezclas convencionales. Para análisis en el corto plazo, se recomienda realizar medición de módulo a probetas recién fabricadas.

Se ha encontrado que el modulo de rigidez que se obtiene de las gráficas del Método de Diseño de Shell, corresponde a un valor más bajo que el módulo de rigidez obtenido en laboratorio para probetas recién fabricadas. Además, existe una relación entre el valor de módulo realizado a una probeta asfáltica, y el módulo obtenido de un testigo de pavimento,

ambos analizados en laboratorio con el mismo método de ensayo. Por esto, es recomendable considerar que el módulo de rigidez obtenido en laboratorio no necesariamente corresponde al módulo que se obtendrá en el pavimento, por lo cual se debe realizar esta corrección para efectos de diseño.

Por otro lado, se presenta un protocolo de instrumentación de pavimentos asfálticos, con recomendaciones en cuanto a tipo de instrumentación a utilizar, cantidad y orientación de sensores, y costos asociados.

Palabras Claves: Módulo de Rigidez, Diseño Estructural, Probeta de Laboratorio, Testigo de Pavimento

ABSTRACT

This research is intended to understand hot asphalt mixes behavior, from the point of view of stiffness modulus evolution in time. Stiffness Modulus is used in pavement structural design. Therefore, is important to determine whether this value varies in time. If so, a short term module should be considered for design purposes, and another for long-term design considerations. To verify this hypothesis, different hot asphalt mix laboratory specimens were produced, and stiffness modulus was periodically measured during two years. Selected test method (EN 12697-26) is according to European Standard, because it is a simple and fast method. Besides, it is less likely test specimen to be damaged using this method than others. Selected Test Temperature is 15 °C (59 °F), to ensure an elastic behavior.

On the other hand, a pavement was instrumented, in order to determine in-situ behavior, and establish preliminary if possible get a modulus value comparable with that obtained in laboratory.

From laboratory experience, it can be concluded that asphalt mix stiffness modulus varies on time, and in two years tends to a value between 8000MPa and 10000MPa for conventional mixes. For short term analysis, measuring Stiffness modulus for recently laboratory made specimens is recommended.

It has been found that Stiffness modulus, obtained from Shell Design Method Nomograph, correspond to a lower value than Stiffness Modulus for recently made laboratory specimen. Besides, there is a relationship between laboratory made specimen stiffness modulus, and modulus retrieved from pavement core of the same mix, both analyzed in laboratory with the same test method. Therefore it is recommended to consider that stiffness modulus in

laboratory does not necessarily correspond to stiffness modulus in the pavement. This implies that for design purposes a correction should be made.

On the other hand, asphalt pavements instrumentation protocol is presented, which contains recommendations about type of instrumentation to be used, quantity, sensors orientation and associated costs.

Keywords: Stiffness Modulus, Structural Design, Laboratory Specimen, Pavement Core

CAPITULO I: INTRODUCCION

1.1. Origen de la Idea de Estudio

Se ha detectado que en Chile no existe un conocimiento acabado del módulo resiliente, o de rigidez para un pavimento asfáltico, ni de cómo este puede verse afectado ante factores externos como la temperatura, carga, o incluso la edad del pavimento. Variables como la temperatura, carga aplicada, y velocidad de carga, han sido ampliamente estudiadas, y existe consenso en que el módulo depende de ellos. Sin embargo, al especificar, o medir el módulo, ya sea en laboratorio o en terreno, no se considera la edad del pavimento asfáltico.

Es por esto que en el presente estudio se abordó en particular el tema de la evolución en el tiempo del módulo de rigidez en pavimentos asfálticos.

1.2. Antecedentes Generales

Las fallas en los pavimentos asfálticos se clasifican en tres tipos:

- Ahuellamiento
- Agrietamiento térmico
- Fatiga

Al respecto, se puede asumir que el ahuellamiento y el agrietamiento térmico están orientados a una selección de materiales adecuados y a procedimientos de diseño de mezcla [Gómez-Achecar y Thompson, (1984); Thompson y Cation, (1986); Thompson, (1996) y Thompson y Carpenter, (2004)]. Luego, el parámetro crítico para el diseño estructural es la deformación horizontal por tracción, la cual está asociada a la fatiga. De esta forma, mientras menor sea esta deformación, mayor será la vida a la fatiga.

Los métodos de diseño estructural consideran la estructura de pavimento como un sistema multicapa elástico lineal, en el cual los materiales se caracterizan por su módulo de elasticidad de Young, y por su razón de Poisson (Shell, 1978).

El Módulo de Elasticidad es uno de los parámetros fundamentales en el diseño estructural de pavimentos (Ullidz, 1987), y se utiliza para calcular las tensiones y deformaciones que se producen en las capas del pavimento. En el diseño y análisis de pavimentos asfálticos, el Módulo Resiliente se utiliza como el Módulo de Elasticidad y se basa en la deformación recuperable bajo cargas repetidas (Loulizi et al., 2002). Por otro lado, el método de diseño Shell estima el valor de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica a través de varias gráficas, considerando las características del cemento asfáltico utilizado, y de las propiedades volumétricas de la mezcla.

El valor de módulo puede obtenerse a través de ensayos de laboratorio a probetas, y también midiendo directamente en terreno, mediante equipos especializados o instrumentación. Sin embargo, los valores obtenidos mediante estos métodos no siempre son comprables entre sí.

Para la determinación de este parámetro en laboratorio existen muchos métodos de ensayo, de los cuales algunos han sido estudiados en Chile (Zúñiga et al., 2006; Meléndez, 2008).

Para las mezclas asfálticas fabricadas en caliente, la determinación del módulo resiliente o del módulo de rigidez presenta una serie de complicaciones, ya que éste valor depende de una serie de parámetros, entre los cuales se encuentran la temperatura, la velocidad y la magnitud de la carga aplicada (Comité Europeo de

Normalización, 2005). En general, para la medición del Módulo Resiliente o de Rigidez en laboratorio se aplica un pulso de carga *haversine* sobre el manto lateral de una probeta cilíndrica, y se mide la deformación axial que ésta sufre en cada ciclo de carga (**Figura 1-1**). Este pulso *haversine* está pensado para replicar lo que ocurre en el pavimento: Mientras una rueda de camión se encuentra a una distancia considerable de un punto en el pavimento, la tensión en ese punto es cero; Cuando la rueda está exactamente en el punto considerado, la tensión es máxima. El tiempo de duración del pulso de carga depende de la velocidad del camión y de la profundidad bajo la superficie del pavimento. Se ha encontrado que la ecuación de campana normalizada, o la onda *haversine* representan bien la medición normalizada de los pulsos de carga de compresión vertical normalizados para un vehículo en movimiento (NCHRP 1-37A, 2003).

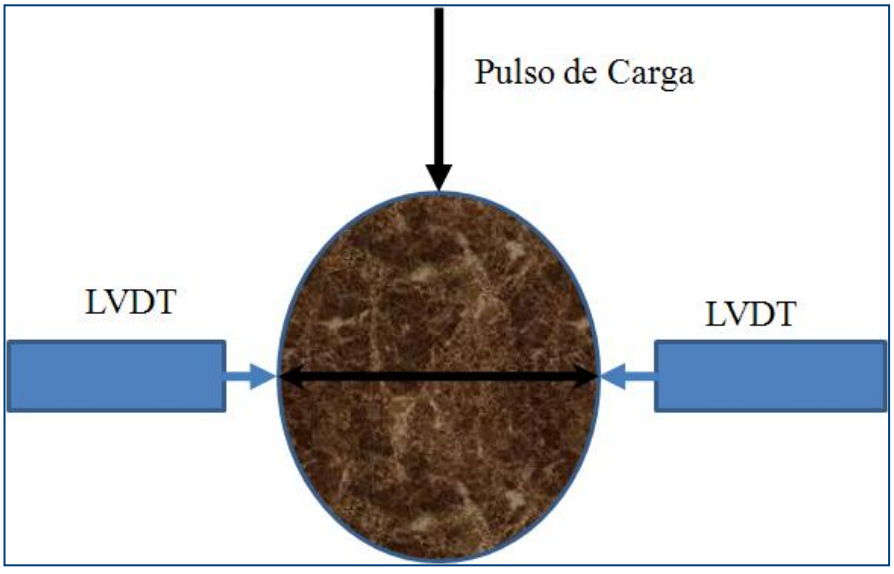

Figura 1-1: Ensayo de módulo por carga indirecta

La ecuación general que se utiliza para este cálculo es:

$$M_R = \frac{F*(\nu + 0.27)}{(z*h)} \quad (1.1)$$

donde:

M_R : Módulo Resiliente (o de Rigidez), expresado en MPa

F : Carga vertical axial aplicada, expresada en Newton

z : Amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga, expresada en mm

h : Espesor de la probeta, expresada en mm

ν : Razón ó coeficiente de Poisson, el cual generalmente se asume como ν=0,35 para mezclas asfálticas.

1.2.1. Módulo Complejo, Módulo Resiliente y Módulo de Rigidez

Módulo complejo, E*:

El cemento asfáltico es un material viscoelástico. Esto quiere decir que su comportamiento y consistencia dependen de la temperatura. De este modo, a altas temperaturas (Sobre 70°C aproximadamente) se comporta como un fluido Newtoniano (Viscoso), y a bajas temperaturas (Bajo la temperatura ambiental) se comporta como un material elástico. Por otro lado, a temperaturas intermedias (Temperatura ambiente) este material presenta un comportamiento intermedio entre un material viscoso y elástico. El módulo complejo corresponde a la relación entre el esfuerzo y la deformación para un material viscoelástico (Como el asfalto), sujeto a

una carga de forma sinusoidal en un tiempo t, donde al aplicar una tensión "σ sen(wt)" se obtiene una deformación "ε sen(w(t-Ø))", que tiene un ángulo de fase Ø, respecto a la tensión (**Figura 1-2**). Cabe mencionar que la amplitud de la deformación y el ángulo de fase son función de la frecuencia (w), y la temperatura de ensayo.

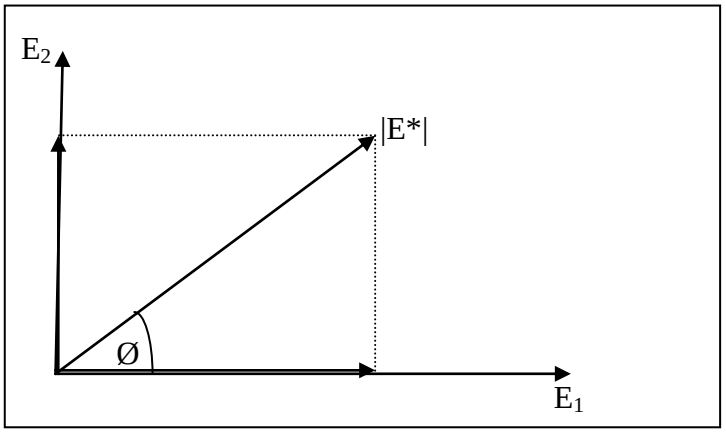

Figura 1-2: Representación gráfica del módulo complejo. El Eje E_1 representa la componente elástica, y E_2 representa la componente viscosa

Luego, el módulo complejo puede expresarse como:

$$E^* = |E^*| \ (\cos(Ø) + i \operatorname{sen}(Ø)) \qquad (1.2)$$

De la **Figura 1-2** se aprecia que el módulo complejo está conformado por dos componentes:

- Una componente real: E_1 ,que corresponde a la componente elástica de la mezcla asfáltica:

$$E_1 = |E^*| \cos(Ø) \qquad (1.3)$$

- Una componente imaginaria: E_2, que corresponde a la componente viscosa del material:

$$E_2 = |E^*| \operatorname{sen}(Ø) \qquad (1.4)$$

Por otro lado, el valor absoluto del módulo complejo es:

$$\left|E^*\right| = \sqrt{E_1^{\,2} + E_2^{\,2}} \qquad (1.5)$$

El ángulo de fase se obtiene de la siguiente expresión:

$$Ø = \text{Atan}(E_2/E_1) \qquad (1.6)$$

El módulo elástico en compresión, |E*|, de la mezcla es similar en principio al módulo complejo de corte del ligante, G*, desarrollado por la Strategic Highway Research Program (SHRP). Los dos módulos, G* y E*, están relacionados teóricamente a través de la relación:

$$E^* = 2(1+u)\, G^* \qquad (1.7)$$

donde u= Razón de Poisson

Para materiales puramente elásticos, el ángulo de fase es cero, y en ese caso el modulo complejo se hace igual al módulo de Young. Esto ocurre cuando los materiales asfálticos se encuentran a bajas temperaturas, y/o cuando el asfalto se encuentra envejecido. En este caso el módulo complejo alcanza su máximo valor posible.

Módulo de Rigidez:

Corresponde al valor absoluto del módulo complejo, o el valor del módulo secante, es decir, a la relación entre el esfuerzo y la deformación en un tiempo de carga "t", para un material sujeto a una carga con una tasa de deformación controlada. De esta forma, para bajas temperaturas (Rango elástico), el Módulo Complejo es igual al Módulo de Rigidez.

Módulo Resiliente:

Al trabajar con mezclas asfálticas en pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama Módulo Resiliente.

Existe una diferencia conceptual entre el Módulo Resiliente y el Módulo de Rigidez, toda vez que para la determinación del Módulo de Rigidez se considera la deformación producida en el momento de aplicar la carga, y para la determinación del Módulo Resiliente se considera la deformación recuperable luego de aplicar la carga. A este respecto, cabe mencionar que, dadas las características viscoelásticas de la mezcla asfáltica, la deformación recuperable se puede separar en dos componentes: La deformación recuperable en forma instantánea luego de finalizar el pulso de carga, y la deformación recuperable total, que se produce con un pequeño desfase luego de eliminada la carga (Al terminar el período de relajación). Es por esto que en cuanto a módulo resiliente se habla de Módulo Instantáneo y Módulo Total (**Figura 1-3**).

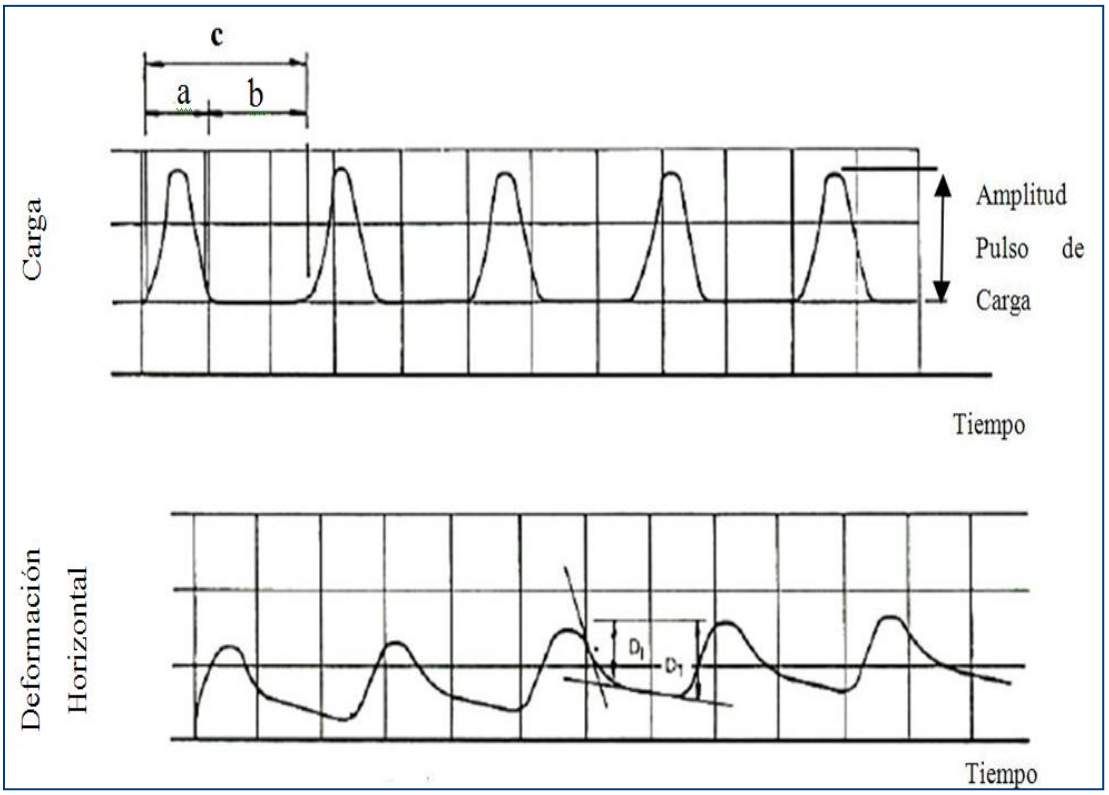

Figura 1-3: Forma del pulso de carga Haversine, y deformaciones total e instantánea en mezclas asfálticas. (Fuente: AASHTO TP31)

De la **figura 1-3** se aprecia:

a= Duración del pulso de carga durante la aplicación de un ciclo de carga

b= Tiempo de Relajación

c= Duración del ciclo

Di, Dt = Deformaciones resilientes instantánea y total

Las fórmulas de cálculo en cada caso son:

$$M_{Rigidez} = \frac{F*(\nu+0.27)}{(z\ *h)} \tag{1.8}$$

$$M_{Ri} = \frac{F * (\nu + 0.27)}{(z_i * h)} \tag{1.9}$$

$$M_{Rt} = \frac{F * (\nu + 0.27)}{(z_t * h)} \tag{1.10}$$

Donde:

$M_{Rigidez}$: Módulo de Rigidez

M_{Ri}, M_{Rt}: Módulo Resiliente Instantáneo y Total, respectivamente

F: carga vertical axial aplicada

ν: coeficiente de *Poisson*

h: espesor de la probeta

Z: Deformación de la probeta durante la aplicación de la carga

Z_i , Z_t: deformación resiliente instantánea y total, respectivamente

La **figura 1-4** representa gráficamente la deformación que cada método considera:

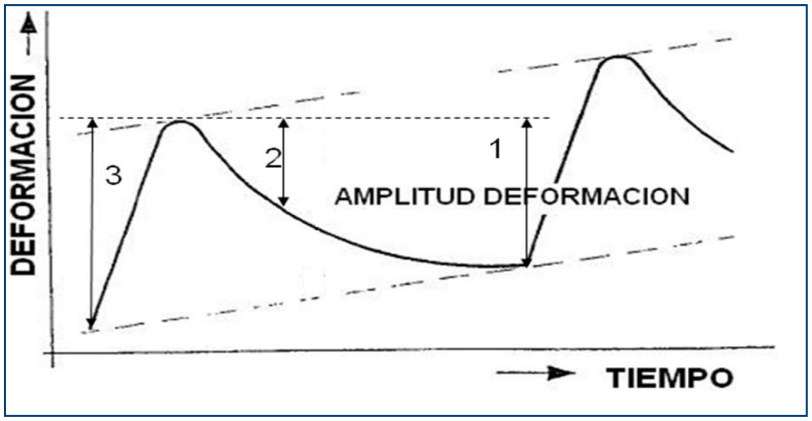

Figura 1-4: Representación gráfica de la deformación de la mezcla asfáltica ante un pulso de carga considerada por cada método.

donde:

1: Z_t: deformación resiliente total

2: Z_i: deformación resiliente instantánea

3: Z: Deformación de la probeta durante la aplicación de la carga

Se debe considerar que, si las cargas aplicadas son lo suficientemente pequeñas, y las temperaturas de ensayo no son altas, las deformaciones producidas deberían estar dentro del rango elástico, por lo cual, teóricamente, la deformación producida durante la aplicación de la carga debería ser igual a la deformación recuperable (No existe deformación permanente). De este modo, en ese caso el módulo de Rigidez sería igual al Módulo Resiliente, y el módulo dinámico tendría sólo componente elástica, por lo que también sería igual al módulo de rigidez (**Figura 1-5**). Cabe destacar que los métodos de medición de Módulo Resiliente y Módulo de Rigidez

intentan trabajar con deformaciones elásticas, por lo que es válido asumir que en estas condiciones ambas deformaciones lo son.

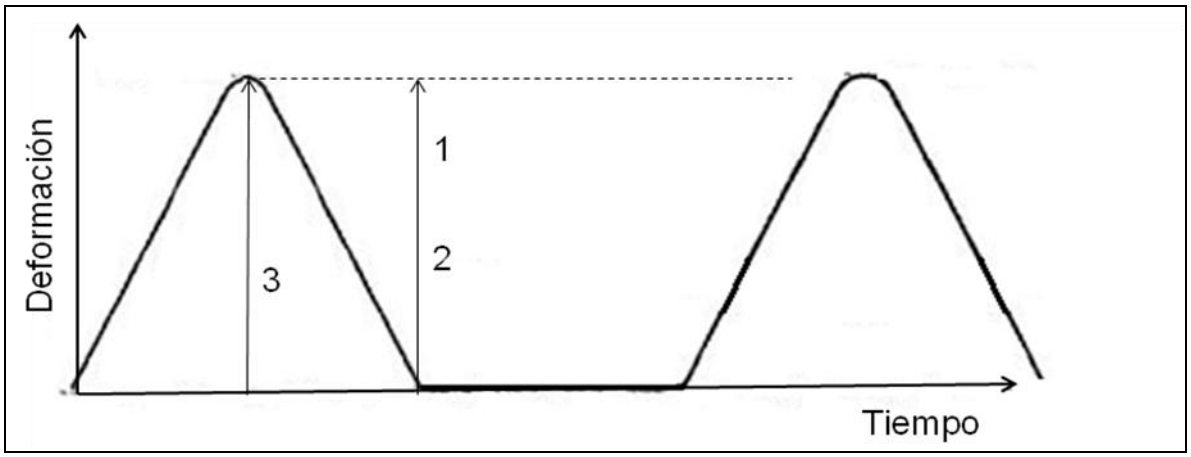

Figura 1-5: Representación gráfica de la deformación de la mezcla asfáltica ante un pulso de carga, a baja temperatura (Comportamiento elástico). En este caso 1, 2 y 3 son iguales.

donde:

1: Z_t: deformación resiliente total

2: Z_i: deformación resiliente instantánea

3: Z: Deformación de la probeta durante la aplicación de la carga

Para esta investigación se decidió trabajar con el Método EN 12697-26: 2006 Anexo C, "Indirect tension in cylindrical specimens Test", que mide el módulo de Rigidez. Esto debido a su uso masivo en Europa, y a que los métodos para determinar módulo resiliente, AASHTO TP31 (2006) “Standard Test Method for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension” y ASTM D4123-82 (1995), “Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures”, son ensayos más largos, y utilizados para capas asfálticas gruesas. Por otro lado, en Chile aún no se tiene el equipamiento para realizar mediciones de módulo complejo a las mezclas asfálticas.

1.3. Descripción del Problema

La adecuada determinación del módulo, así como el tipo de módulo a considerar en pavimentos asfálticos reviste suma importancia, ya que este valor se utiliza como variable de entrada en el diseño estructural de pavimentos asfálticos.

Actualmente en Chile no existe mucho conocimiento en relación a la determinación del módulo en las mezclas asfálticas, ni cómo varía este valor en el tiempo. Por lo mismo, no se ha validado ni especificado una metodología para determinar el módulo resiliente ni de rigidez de una mezcla asfáltica en laboratorio. Esto conlleva a que los métodos mecanicistas de diseño estructural de pavimentos asfálticos consideren un valor de módulo general para cada tipo de mezcla, u obtenido por fórmulas o tablas, asumiendo que este módulo es único y no tiene variación en el tiempo. Por otro lado, en Chile tradicionalmente se ha utilizado como variable de entrada en diseño de pavimentos asfálticos (AASHTO 1993) el Módulo Resiliente de las capas granulares, el cual a su vez se obtiene de correlaciones con el valor de la Razón de Soporte California (CBR por sus siglas en inglés). Esta costumbre ha provocado que, con el desarrollo de la tecnología y los nuevos equipos para medición en mezclas asfálticas, se busque intuitivamente determinar el módulo Resiliente de la mezcla asfáltica compactada. Sin embargo, si se considera que la determinación del módulo resiliente se realiza como una estimación del modulo de Young (Elástico), sería más aconsejable, desde ese punto de vista, considerar el módulo de Rigidez, que resulta más simple y rápido de aplicar en mezclas asfálticas, y que representa de mejor forma el modulo de Young.

En cuanto a la determinación del módulo en pavimentos construidos, actualmente se utiliza Deflectometría de impacto, con lo cual, mediante retrocálculo, se determina el módulo resiliente del pavimento. Sin embargo, al realizar esta determinación, no se considera la edad del pavimento.

1.4. Hipótesis

Las hipótesis de este trabajo son:

1.4.1 El módulo en pavimentos asfálticos convencionales aumenta en el tiempo hasta un cierto punto en que tiende a hacerse constante, disminuye su dependencia de la temperatura y carga.

1.4.2 Se puede determinar módulo por distintos métodos, con resultados comparables. Estos métodos son:

- Medición en laboratorio :
    a. Probetas de laboratorio
    b. Testigos de pavimento

- Medición en terreno:
    a. Instrumentación de pavimento
    b. Deflectometría de Impacto en terreno

De esta forma, para el diseño estructural de pavimentos asfálticos se podría considerar un valor de módulo a largo plazo, que sería independiente del tipo de mezcla asfáltica utilizada, y un módulo a corto plazo, que se debería obtener para cada tipo de mezcla. Con estos dos módulos, se podría entonces predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica en el corto y el largo plazo.

1.5. Objetivos

De acuerdo a las hipótesis propuestas, los objetivos generales de esta tesis consisten en comprobar que el módulo en un pavimento asfáltico varía en el tiempo, para luego de unos años hacerse constante. También se considera validar la medición de módulo de mezclas asfálticas en laboratorio, mediante la metodología propuesta, así como la determinación de este parámetro en terreno mediante instrumentación del pavimento.

Dentro de los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- Implementar un protocolo de instrumentación de pavimentos asfálticos, para realizar medición de módulos en terreno.

- Comparar las mediciones de terreno mediante instrumentación y Deflectometría de Impacto con los obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

- Comprobar, a partir de mediciones por medio de ensayos de laboratorio, la evolución de los valores de módulo para las mezclas asfálticas en caliente, en el tiempo, para una temperatura dada. De este modo obtener un valor de módulo para el largo plazo.

- Generar transferencia tecnológica y ampliar el conocimiento en cuanto a la instrumentación de pavimentos en Chile.

1.6. Metodología de Investigación

La metodología considera:

- Se trabajó con varios diseños Marshall para carpeta asfáltica (Manual de Carreteras, 2008).
- En laboratorio se fabricaron probetas para cada diseño, y se realizó medición de módulo, de acuerdo al método EN 12697-26 Anexo C, para una temperatura

de 15°C, utilizando equipo *Nottingham Asphalt Tester* (NAT), modelo NU-14, perteneciente al Laboratorio Nacional de Vialidad. Estas mediciones se realizaron cada cierto tiempo a las mismas probetas, con objeto de determinar su evolución en el tiempo. El tiempo entre ensayos fue aleatorio. Finalmente, se realizó el ensayo a un grupo de probetas, a 25ºC, con objeto de comprobar si una vez envejecida la mezcla, el valor de módulo sigue siendo dependiente de la temperatura.

- Se extrajeron testigos de pavimento de dos contratos, con distintos diseños y edades de pavimentos, y se realizaron mediciones de módulo en Laboratorio. Además, se fabricaron probetas de laboratorio con una mezcla de uno de estos pavimentos, con objeto de comprobar la relación que existe entre probetas de laboratorio y testigos de terreno.
- Se definió instrumentación adecuada para efectuar mediciones: Precio, cantidad y ubicación. Se determinaron costos asociados a la instrumentación.
- Confección de tramo de prueba: Se instrumentó un pavimento construido de acuerdo a un diseño tipo.
- Se realizaron mediciones de deformaciones en el tramo de prueba en condiciones controladas, es decir, bajo una carga conocida, a velocidad y temperatura también conocidas. Se verificó si con esta información se puede determinar el módulo de rigidez en tiempo real.
- Por último, se encuentra la etapa de Análisis estadístico de resultados, conclusiones, y elaboración de protocolo de instrumentación de pavimentos, lo

cual constituye una herramienta que facilitará el trabajo para futuros investigadores.

A continuación se presenta un diagrama de flujo, que representa esquemáticamente las actividades realizadas:

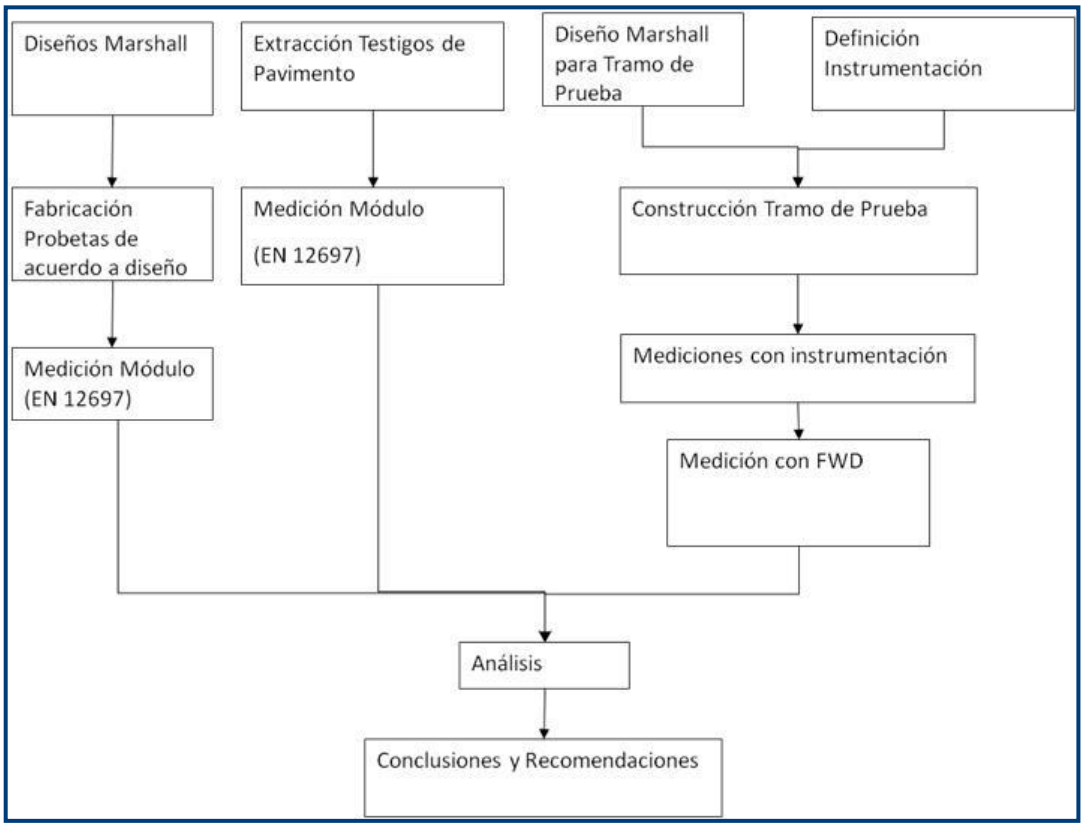

Figura 1-6: Diagrama de Flujo de las actividades realizadas e la investigación
(Fuente: Elaboración Propia)

1.7. Alcances de la Investigación

En la presente investigación el estudio se centró en carpetas asfálticas. Para esto, se consideraron tres mezclas cuyas granulometrías corresponden a la Banda IV-12, que es la banda granulométrica especificada para carpetas asfálticas en el Manual de Carreteras del año 1997. Por otro lado, también se consideran siete mezclas correspondientes a la Banda granulométrica IV-A-12, que es la banda especificada para carpetas asfálticas en el Manual de Carreteras, desde el año 2003:

Tabla I-1: Mezclas consideradas en la etapa de Laboratorio

Tipo	Fecha Fabricación	Tipo Mezcla	Banda	%CA	Observación
1	27/05/2009	Carpeta	IV-A-12	5.3	-----
2	11/02/2009	Carpeta	IV-A-12	5.5	Mezcla Alto Módulo
3	17/08/2008	Carpeta	IV-12	6.1	-----
4	10/03/2008	Carpeta	IV-12	5.5	-----
5	27/05/2008	Carpeta	IV-12	5.7	-----
6	19/05/2008	Carpeta	IV-A-12	5.3	-----
7	17/09/2008	Carpeta	IV-A-12	5.0	50 golpes
8	17/09/2008	Carpeta	IV-A-12	5.0	-----
9	17/09/2008	Carpeta	IV-A-12	5.0	-----
10	17/09/2008	Carpeta	IV-A-12	5.0	50 Golpes

donde:

- La mezcla N°2 corresponde a una mezcla “no convencional”. Esta mezcla en particular es una mezcla de alto módulo, por lo que el cemento asfáltico utilizado presenta características distintas al resto, principalmente destacado por una penetración más baja.

- La mezcla Nº7 es la misma que la Nº8, con la diferencia de que las probetas de la mezcla Nº7 fueron confeccionadas con 50 golpes por cara. Lo mismo ocurre con la mezcla Nº10 (50 golpes) en relación a la Nº9.

Para la construcción del tramo de prueba, se trabajará con una mezcla de Carpeta, Banda IV-A-12, que es la que actualmente está especificada para carpetas asfálticas en Chile.

1.8. Estructura de la Tesis

La presente Tesis está compuesta por cuatro Capítulos:

Capítulo I. Introducción: Se presenta una introducción al tema. Se describe el problema, la hipótesis y los objetivos de esta investigación, así como la metodología a seguir para cumplir con los objetivos propuestos, dentro de los alcances planteados.

Capítulo II. Laboratorio: Consta de cinco secciones:

1. Ensayos: En esta parte se describen los ensayos de laboratorio considerados para determinar el módulo. Además se presenta una detallada descripción de los equipos para realizar los ensayos. También se presentan estudios relacionados al tema. Por último, se describen las normativas de ensayo que se utilizarán, así como las especificaciones existentes en otros países.

2. Implementación del ensayo: Se presenta la implementación del ensayo. Con respecto a los ensayos de laboratorio, se decidió trabajar bajo la normativa europea. Se realiza una descripción de las instalaciones requeridas para realizar los ensayos, y del acondicionamiento de este equipo. Se describe el procedimiento de fabricación

de probetas, de medición de módulo en laboratorio, y se presenta la evaluación de la precisión del ensayo a través de su repetibilidad.

3. Metodología experimental: En esta sección se presenta la metodología experimental: El diseño experimental y las variables de diseño. También abarca otros factores como cantidad de réplicas, metodología para la toma de muestras, toma de datos y análisis.

4. Resultados: En esta sección se presentan los resultados obtenidos con las probetas de laboratorio y con los testigos de pavimento.

5. Análisis de datos: Se presenta el análisis de los datos obtenidos

Capítulo III: terreno: También consta de cinco secciones:

1. Métodos de Ensayo: En esta parte se describen los ensayos de terreno considerados para determinar el módulo in situ: Instrumentación de pavimento, Deflectometría de Impacto. Además se presenta una detallada descripción de los equipos para realizar dichas mediciones. También se presentan estudios relacionados al tema. Por último, se describen las normativas de ensayo que se utilizarán, así como las especificaciones existentes en otros países.

2. Implementación del ensayo: Se presenta la implementación del ensayo. Se realiza una descripción de las instalaciones del tramo de prueba requeridas para realizar las mediciones.

3. Metodología experimental: En esta sección se presenta la metodología experimental: El diseño experimental y las variables de diseño. También abarca otros factores como cantidad de réplicas, metodología de toma de datos y análisis.

4. Resultados: En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de terreno.

5. Análisis de datos: Se presenta el análisis de los datos obtenidos

Capítulo IV: conclusiones: En esta parte se presentan las Conclusiones y comentarios en base a los resultados obtenidos tanto en terreno como en Laboratorio. Finalmente, se presentan sugerencias para futuras líneas de investigación.

CAPITULO II: LABORATORIO

2.1. Métodos de Ensayo

Existen varios métodos de ensayo para determinar el módulo en laboratorio para una mezcla asfáltica. Entre ellos se encuentran: Ensayo triaxial a probetas cilíndricas y Método indirecto por carga diametral a probetas cilíndricas.

En esta investigación, se considera la determinación indirecta por carga diametral, dado que se cuenta con este equipo de laboratorio, y a que este es el método más económico y confiable disponible.

2.1.1. Equipos de Laboratorio

En este estudio se trabajó en el equipo *Nottingham Asphalt Tester* (NAT), Modelo NU-14, perteneciente al Laboratorio Nacional de Vialidad.

Esta prensa consta de:

- Un marco de carga (**Figuras 2-1 y 2-2**)
- Un sistema servoneumático de carga,
- Un sistema de adquisición de datos (**Figura 2-3**)
- Transductores de tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) (**Figura 2-4**)
- Una cámara termostatizada que permite regular y mantener la temperatura a la que se desea realizar el ensayo (**Figura 2-5**)
- Un compresor de aire de capacidad 1 MPa.
- Un equipo de aire acondicionado para regular la temperatura ambiente en la habitación en que se encuentra el quipo, de modo que al abrir la puerta de la cámara, el gradiente térmico no sea muy alto.

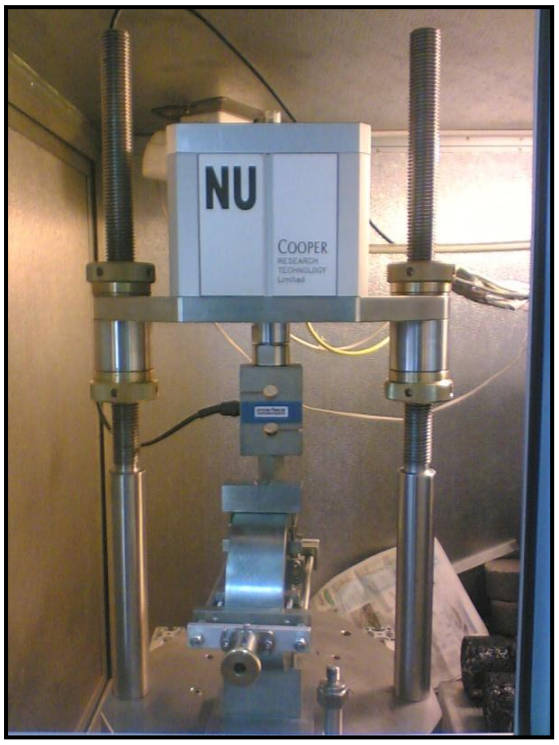

Figura 2-1: Marco de carga del equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT).

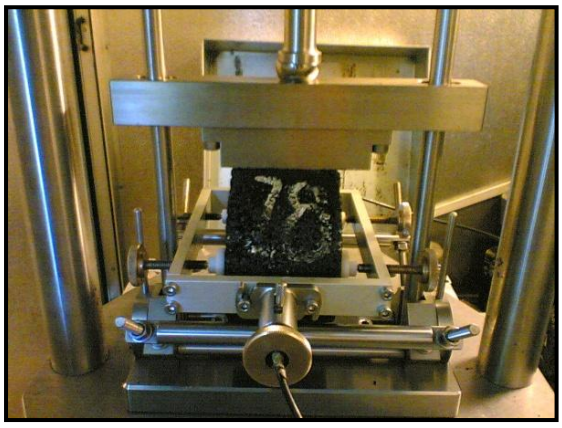

Figura 2-2: Probeta en el submarco de carga durante ensayo indirecto por carga diametral.

Figura 2-3: Sistema de adquisición de datos utilizado en la investigación

Figura 2-4: Transductores LVDT para medición de deformación por carga diametral.

Figura 2-5: Cámara Térmica del equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT)

2.1.2. Estudios de medición de módulo

Los estudios en el mundo sobre módulos resilientes tienen larga data. Ya en 1962, Papazian aplicó una carga sinusoidal a una probeta cilíndrica a una frecuencia dada, y midió la deformación de respuesta para dicha frecuencia. Por otro lado, Clyne (2003) propone utilizar el módulo complejo (E*) de la mezcla asfáltica como criterio de diseño. La desventaja de esto es que la medición de E* requiere de equipos mas sofisticados que los utilizados para medición de módulo de rigidez. Actualmente estos equipos no están disponibles en Chile.

En Chile, se han realizado estudios sobre medición de Módulo Resiliente y de Rigidez con carga diametral (Zúñiga et al, 2006). En ellos se recomienda la medición de módulo de rigidez, por ser un ensayo más rápido y confiable.

2.1.3. Normativas de ensayo

Actualmente en Chile no está normalizado este tipo de ensayos, por lo cual se utilizan Normas extranjeras. Las más utilizadas son: Para Módulo Resiliente: ASTM D4123-82 y ASHTO TP31. En los **Anexos 1 y 2** se presenta una explicación de estos métodos, utilizando el equipo N.A.T. Para Módulo de rigidez el método de ensayo más utilizado es el EN 12697-26: 2006 Anexo C : “Test de tensión indirecta en probetas cilíndricas”.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre estos tres métodos:

Tabla II-1: Comparación entre métodos para medición de módulo

Norma	EN	ASTM	AASHTO
Controla	Deformación	Carga	Carga
Carga (para 25ºc)	-----	10-50%	15%
Frecuencia (Hz)	0,33	0,33 0,5 1	1
Tiempo de pulso de carga (Risetime) (ms)	124±4	300 200 100	100
Deformación vertical acumulada (mm)	0,005% del diámetro de la probeta	<0,025	>0,0025 <1,25
Ciclos de Carga	5:acondicionamiento 5 : medición	200 500	200 - 500
Mrigidez	P(u+0,27)/D*h	-----	-----
Mresiliente Instantáneo	-----	P(u+0,27)/Di*h	P(u+0,27)/Di*h
Mresiliente Total	-----	P(u+0,27)/Dt*h	P(u+0,27)/Dt*h
Coeficiente de Poisson para 25ºC	0,35	0.35	3,59*DH/DV-0,27
Mr corregido	Mr(1-0,332*(Log Mr)-1,82)*(0,6-k)	-----	-----

donde:

M_{RI} : Módulo resiliente instantáneo (MPa)

M_{RT} : Módulo resiliente total (MPa)

P : Carga vertical máxima aplicada (N)

D_i, D_T : Deformación resiliente instantánea o total

DH : Deformación Horizontal

DV : Deformación Vertical

K : Factor de área medido para la aplicación de carga

h : Espesor de la probeta (mm)

u : Razón ó coeficiente de Poisson

Cabe destacar que estos tres métodos, si bien es cierto tienen diferencias conceptuales, principalmente en cuanto a la deformación que consideran, coinciden en el fin que persiguen, que es obtener un valor estimativo del módulo de Young. En general, los métodos de Carga controlada se utilizan para pavimentos gruesos, mientras que los de deformación controlada se realizan a pavimentos delgados, tal como para este estudio.

De estos métodos, se ha decidido trabajar con el método EN 12697-26: 2006 Anexo C, ya que es la metodología más rápida, y además, presenta los módulos más bajos (Zúñiga et al, 2006), siendo este el peor escenario considerado al momento de realizar un diseño. Además, esta metodología de ensayo es no destructiva, lo cual permite realizar mediciones a las mismas probetas en el tiempo.

Cabe mencionar que en este análisis no se considera la determinación del módulo complejo de la mezcla asfáltica, ya que al momento de realizar esta investigación no se dispone en Chile del equipo necesario para realizar estos ensayos.

2.1.4. Descripción del ensayo determinación del módulo de rigidez

Este procedimiento se basa en la normativa europea EN 12697-26: 2006 anexo C, "Test de tensión indirecta en probetas cilíndricas"

El test de tensión indirecta es un método no destructivo que permite determinar el módulo de rigidez de los materiales asfálticos de pavimentos para una deformación horizontal seleccionada. Este ensayo se realiza normalmente sobre especímenes (probetas) de diámetro de 100 ó 150 mm, con un espesor entre 50 a 70 mm generalmente.

Durante el ensayo, la probeta cilíndrica es sometida a cargas axiales de compresión de forma ondulada (*Haversine*). La carga se aplica verticalmente en un plano diametral del espécimen cilíndrico. El aparato N.A.T. proporciona para este ensayo pulsos de cargas en forma repetitiva con períodos de descanso. Los tiempos de carga están comprendidos entre los 50 y 150 milisegundos. En la **Figura 2-6** se presenta la forma del pulso de carga:

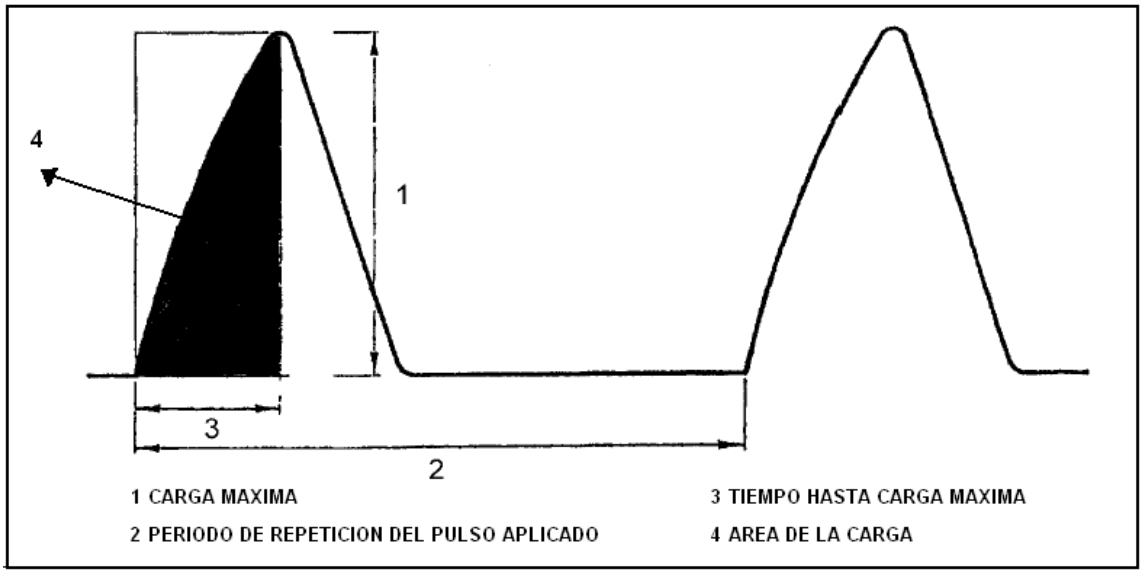

Figura 2-6: Forma del pulso de carga y Factor de área de carga

El tiempo hasta la carga vertical máxima es medido desde la carga cero hasta su máximo valor, este tiempo deberá ser de 124 ± 4 ms. (milisegundos), lo que corresponde a una velocidad de alrededor de 100 Km /h. La carga máxima deberá corregirse de manera de obtener una deformación horizontal transiente máxima de 0,005% del diámetro de la probeta. Luego, dado que las probetas utilizadas en este estudio poseen un diámetro del orden de 100 mm, la deformación corresponde a 5 micrones. Para poder lograr esto, la carga máxima deberá ajustarse para obtener un factor de área de la carga de 0,6 ± 0,1. Este es el valor recomendado para cargas rutinarias. El Factor de área de carga (Nunn and Smith, 1997) es la razón entre el área bajo la curva de carga y el Tiempo de carga, integrada desde el principio de la carga aplicada hasta que se llega al máximo de carga (**Figura 2-6**).

El período de repetición del pulso aplicado deberá ser de 3 ± 0,1 segundo, lo que equivale a una frecuencia de 0,33Hz.

2.1.5. Procedimiento para medición de modulo con equipo N.A.T.

El equipo NAT tiene un software que facilita la realización de los ensayos, disminuyendo así la fuente de error. En el software se ingresan los datos de entrada con el fin de realizar la primera medición (primer ensayo), tal como se muestra en la **Figura 2-7**.

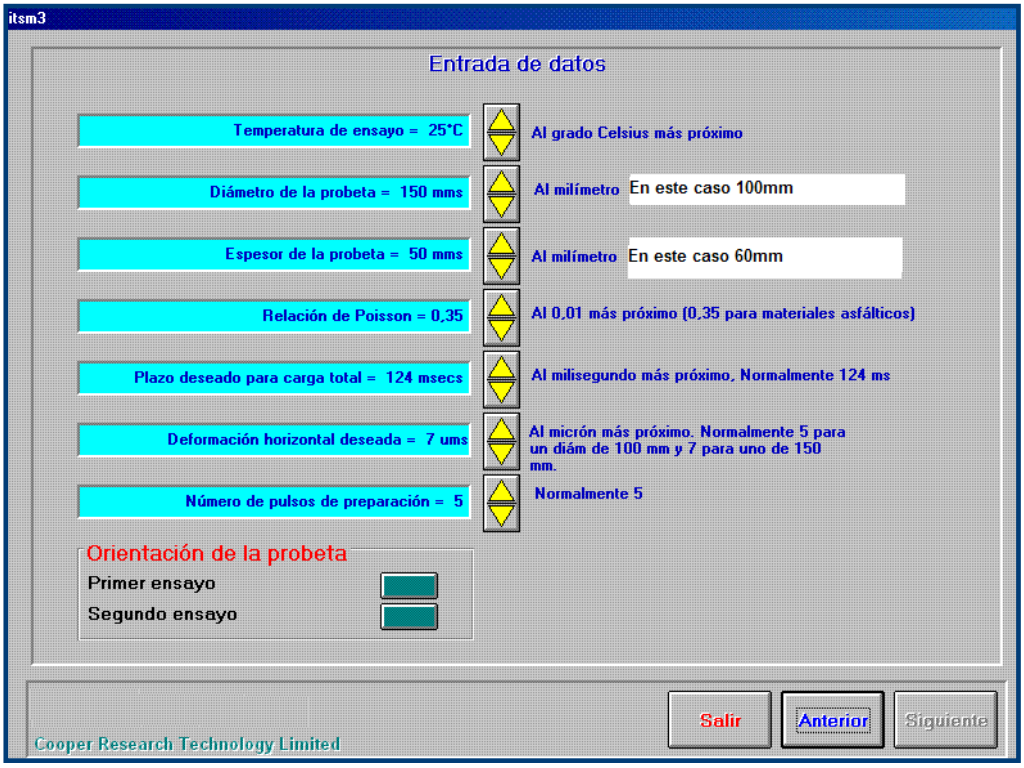

Figura 2-7: Datos de entrada para ensayo, utilizando Software de equipo NAT

Luego de ingresar los datos de entrada se colocan los transductores LVDT **(Figura 2-4)** en las probetas, para realizar entre cinco y quince aplicaciones de pulsos de carga. Esto se hace con la finalidad de calibrar la carga requerida para obtener la deformación deseada, para esa probeta. Es importante recalcar que se debe alinear la altura del submarco de carga **(Figura 2-2)** para asegurar que los transductores se

fijen en los puntos a 90° del punto en que se aplica la carga, de modo de medir la deformación axial **(Figura 2-8)**.

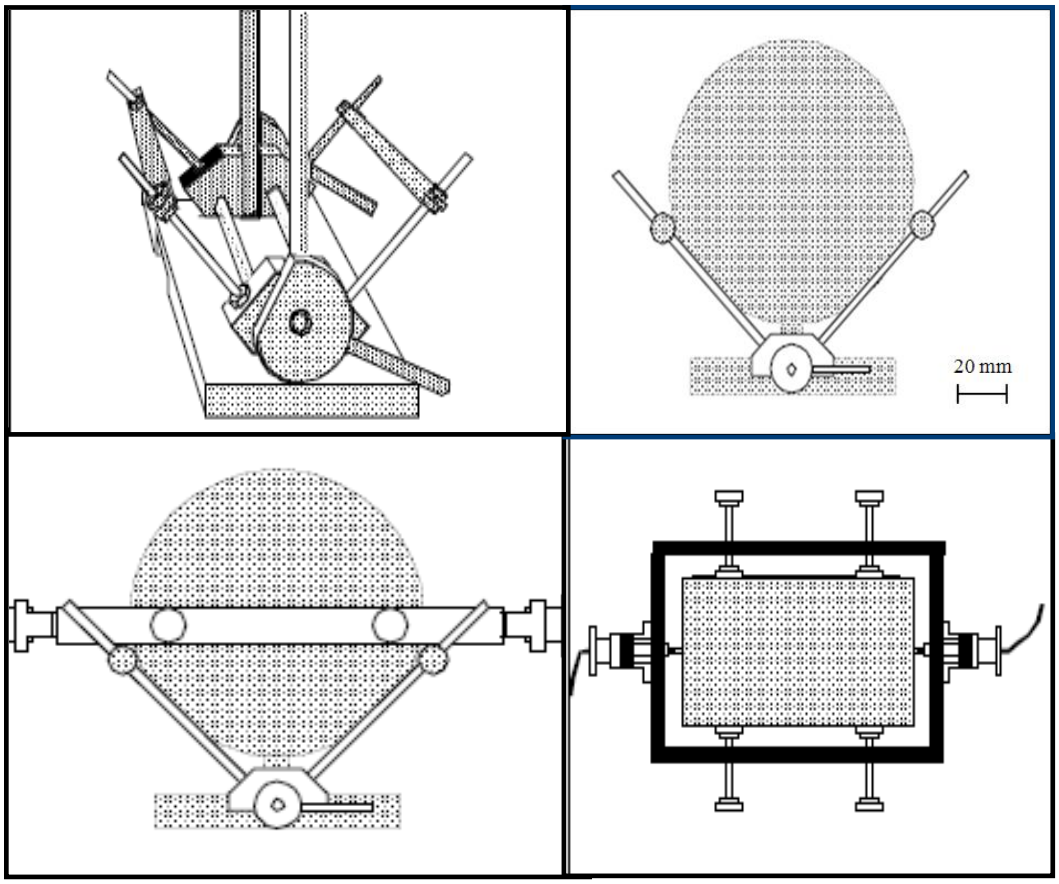

Figura 2-8: Alineación de altura del submarco de carga para colocación de LVDT (Fuente: Manual del NU-14)

Una vez realizados los pulsos de carga se revisan los transductores y se procede a realizar cinco aplicaciones adicionales de pulsos de carga. Con estos últimos cinco pulsos de carga se determina el Módulo de Rigidez de la probeta para esa orientación. El segundo ensayo que se realiza a la probeta debe ser aplicado en una dirección en 90º con respecto a la primera medición.

2.1.6. Cálculo de módulo de rigidez

Luego de aplicar cinco pulsos de carga a la probeta, el software calcula el Módulo de Rigidez, para cada pulso de carga, de la siguiente forma:

$$M_R = \frac{F*(\nu + 0.27)}{(z*h)} \tag{2.1}$$

donde:

M_R : Módulo de Rigidez, expresado en MPa

F : Carga vertical máxima aplicada por el equipo durante el pulso de carga, expresada en N

z : Amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga, expresada en mm

h : Espesor de la probeta, expresada en mm

ν : Razón ó coeficiente de Poisson (Generalmente, para Mezclas Asfálticas en Caliente se asume ν = 0,35)

El software, además, corrige el módulo de rigidez para cada carga, de acuerdo a lo establecido anteriormente (factor de área igual a 0,6), usando la siguiente expresión:

$$M'_R = \frac{(1 - (0{,}322 \text{ x } (\text{Log}_{10} S_m - 1{,}82))\ (0{,}60 - k))\text{ x } M_R}{(1 + B\ (T_1 - T)} \tag{2.2}$$

donde:

T : Temperatura deseada de ensayo

T1: Temperatura real del ensayo

B: Constante de corrección para temperatura entre 20$\pm$ 2^{o}C

B = 9,0 x 10^{-6} x S_m– 0.115

B es cero para rigidez bajo 1000 MPa y a T_1 = T $\pm$ 0,5 ^{o}C.

B= -0,0565 para rigidez medida sobre 6.500 MPa.

k : factor de área medido para la aplicación de carga (El Software entrega este valor)

Sm: Módulo de Rigidez Medido con el factor de área k

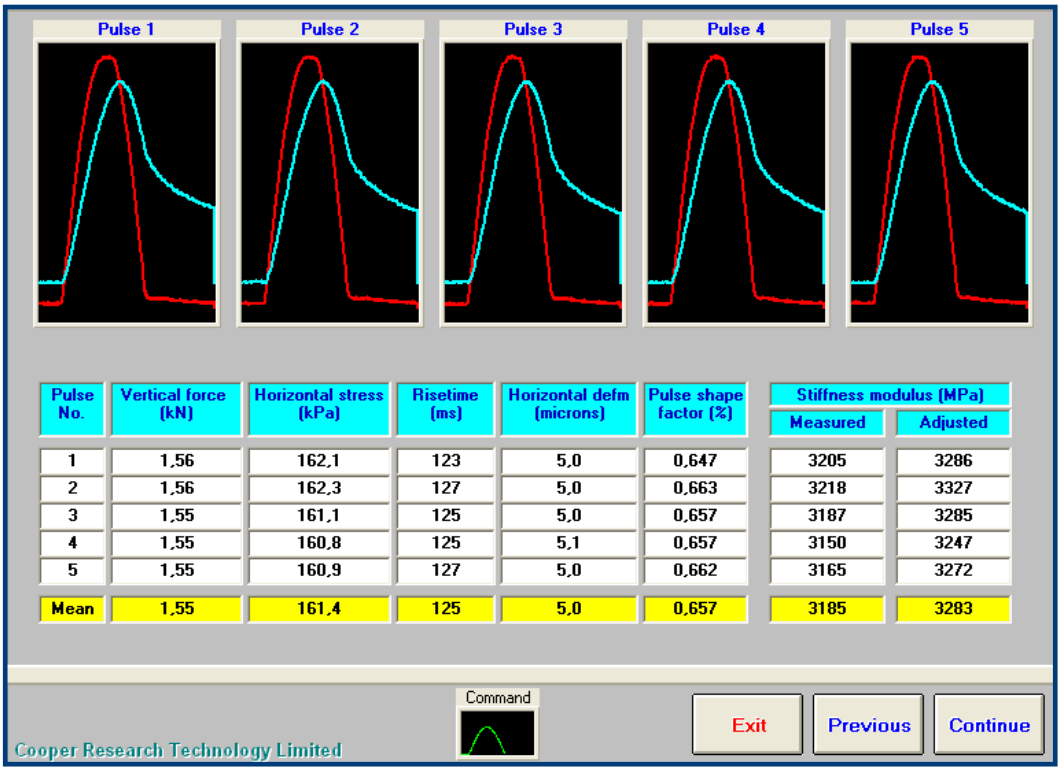

Figura 2-9: Cálculo de módulo de Rigidez con software de equipo NAT

El valor de cada medición de módulo es el promedio de las mediciones de cada uno de los cinco pulsos aplicados **(Figura 2-9).** El valor final es el promedio de las dos mediciones (La primera y la segunda girada a 90°).

2.2. Implementación del Ensayo

2.2.1. Infraestructura y equipos

Para realizar el ensayo se requiere de una prensa NAT, idealmente ubicada en una habitación que disponga de un equipo de aire acondicionado para regular la temperatura ambiente, de modo que al abrir la puerta de la cámara, el gradiente térmico no sea muy alto (Temperatura controlada). La descripción de la prensa NAT se encuentra en el **punto 2.2**. Equipos de Laboratorio. Además, la habitación debe disponer de las instalaciones eléctricas y conexiones de aire para el compresor.

2.2.2. Acondicionamiento del equipo

Antes de realizar el ensayo, se debe realizar un ajuste de la presión de aire, de modo de obtener una presión de 0,6 MPa. También se debe regular la cámara a la temperatura de ensayo deseada (para el caso de esta investigación, 15°C).

2.2.3. Fabricación de probetas

Todas las probetas fueron fabricadas según el método Marshall. Este Método fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. A través de una extensiva investigación y estudios de correlación desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original sólo puede ser aplicado a mezclas asfálticas en caliente, que contengan agregados de tamaño máximo de 25mm (1") o menor, y puede ser usado tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno.

Para este método se confeccionan probetas de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Para confeccionar estas probetas se utiliza un Martillo Marshall

(Figura 2-10), que es un dispositivo conformado por una base de acero plana y circular de 98,4mm de diámetro y un pistón, también de acero, de 4.536 g, montado de tal forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de 457,2 mm (18”). El equipo consta de un pedestal de compactación, que consiste en una pieza prismática de madera de 200 x 200 x 460 mm, con un plato de acero de 305 x 305 x 25 mm. La base de madera debe ser de roble o pino y tener un peso seco de 670 a 770 kg/m^3.

Este dispositivo permite compactar las probetas de ensayo. Para este estudio, se confeccionaron probetas aplicando 75 golpes por cara, a excepción de las mezclas N°7 y N°10, que fueron confeccionadas aplicando 50 golpes por cara **(Tabla I-1)**.

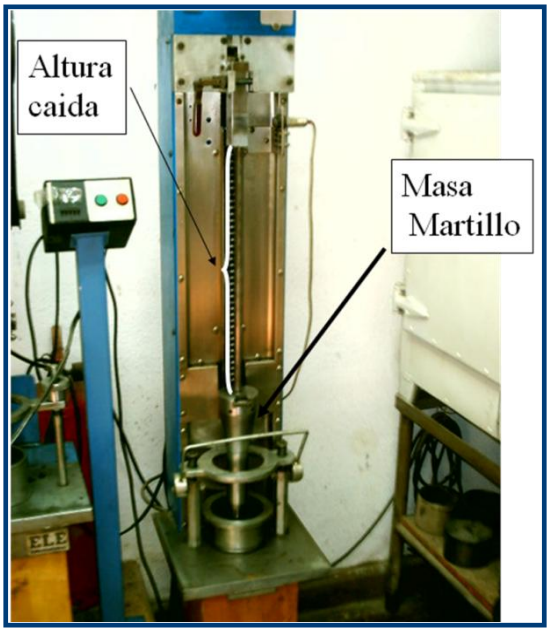

Figura 2-10: Sistema Compactación Marshall (Fuente: Laboratorio Nacional de Vialidad)

El método de diseño Marshall se encuentra descrito en más detalle en el punto 8.8.302.40 del Volumen 8 del Manual de Carreteras.

2.2.4. Testigos de pavimento

Se obtuvieron testigos de carpeta asfáltica de pavimento de los siguientes contratos:

- Ruta G-78, Malloco- Talagante
- Av. Vicuña Mackenna- Santa Isabel

Las condiciones de ensayo fueron:

- Pulsos de acondicionamiento : 5
- Rise Time : 124 mseg
- Dimensiones de la probeta : Probetas Marshall (101 mm de diámetro)
- Deformación horizontal: 5 micrones
- Forma del pulso : Haversine
- Temperatura de ensayo: 15ºC
- Factor del área de carga: 0,6

2.2.5. Evaluación de precisión del ensayo

Para evaluar la precisión del ensayo, los principales conceptos a evaluar son la Repetibilidad y la Reproducibilidad. De acuerdo a Rivas (2006), el significado del parámetro de Repetibilidad es el siguiente:

"Esta variación se presenta cuando el mismo instrumento es utilizado por una persona al medir repetidas veces la misma parte, es decir, es la variación de las lecturas individuales que se han repetido con el instrumento y la misma persona".

También describe el significado del concepto de reproducibilidad:

"Se refiere a la variación observada entre los promedios de varios operadores, cuando cada operador realiza varias lecturas sobre la misma parte y usando el mismo instrumento".

A este respecto, la Norma EN 12697-26: 2006 anexo C, "Test de tensión indirecta en probetas cilíndricas" no ha definido exigencias de precisión. Sin embargo, la Norma indica que para aceptar el ensayo de una probeta, la media del módulo de Rigidez para el segundo ensayo debe estar entre +10% y -20% de la media del primer ensayo. Por otro lado, como criterio general, se ha establecido que la diferencia entre dos valores consecutivos debería ser menor a 2,5%.

Para este estudio, se realizó sólo la determinación de repetibilidad, dado que sólo existe un operador. A continuación se presentan las determinaciones de repetibilidad:

2.2.6. Repetibilidad

En la presente investigación se trabaja con un solo equipo de medición, y sólo un operario, por lo tanto, la Repetibilidad sólo está asociada al equipo de medición, y a la variabilidad propia de la muestra.

Para analizar la repetibilidad, se realizaron mediciones de Módulo de rigidez sobre una celda patrón con el equipo NAT. De esta forma, en caso de obtener una repetibilidad aceptable, la única fuente de variación sería la variabilidad propia de la muestra asfáltica.

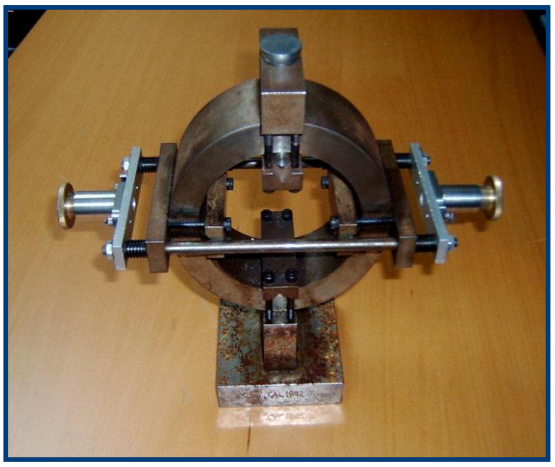

Figura 2-11: Celda patrón utilizada para determinar repetibilidad del ensayo

Esta celda patrón está fabricada de acero, con un módulo conocido y constante, de tal modo que se puede utilizar para chequear el equipo de medición.

Para determinar repetibilidad se realizaron 44 lecturas sobre la celda patrón (**Tabla II-2**), y se determinó su Promedio, varianza, desviación estándar, y Desviación Estándar Relativa (RSD), también conocida como Coeficiente de Variación, que corresponde a la desviación estándar de la muestra, dividida por su media (**Tabla II-3**). La desviación estándar relativa, se expresa, conforme a **DIN 1319:**

$$RSD = 100 \times \frac{N}{\sqrt{N-1}} \times \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})^2}}{\sum_{i=1}^{N} (X_i)} \qquad (2.\ 3)$$

Donde:

RSD =Desviación Estándar Relativa o Coeficiente de Variación (%)

N = Número de muestras de la prueba

Xi = Módulo de Rigidez en la i-ésima medición

$\bar{X}$ = Módulo Promedio de las mediciones

Tabla II-2: Resultados prueba de repetibilidad (Valores en MPa)

N° medición	**Decena**				
Unidad	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
0	-----	2395	2405	2387	2368
1	2361	2384	2390	2384	2364
2	2324	2386	2390	2397	2366
3	2354	2386	2405	2379	2363
4	2364	2378	2391	2371	2358
5	2355	2358	2400	2386	-----
6	2374	2381	2389	2399	-----
7	2357	2382	2403	2356	-----
8	2353	2394	2379	2361	-----
9	2369	2398	2392	2370	-----

Tabla II-3: Análisis estadístico de resultados

Promedio (MPa)	2377
Varianza	313
Desv. Estándar	18
RSD (%)	0.74

donde: RSD= Desviación estándar relativa (%)

A pesar de no estar especificada, el bajo valor de la desviación estándar relativa (Coeficiente de Variación), indica que la variabilidad en los resultados es muy baja, lo que se traduce en una gran exactitud en los resultados obtenidos.

2.2.7. Criterios de aceptación de resultados

Criterio 1: La Norma utilizada en esta investigación indica como criterio de aceptación del ensayo de una probeta, que la media del módulo de Rigidez para el segundo ensayo debe estar entre +10% y -20% de la media del primer ensayo.

Criterio 2: La diferencia entre los valores de dos ensayos consecutivos para el mismo material debe ser menor a 2,5%.

De acuerdo a estos criterios, se analizaron los resultados de los ensayos consecutivos a la celda patrón, lo cuales se presentan en la **Tabla II-4.**

Tabla II-4: Análisis de resultados de ensayos a celda patrón

N° Ensayo	Modulo (MPa)	+10%	-20%	¿Cumple Criterio 1?	Diferencia	¿Cumple Criterio 2?
1	2361	2597.1	1889	SI	-1.6%	SI
2	2324	2556.4	1859	SI	1.3%	SI
3	2354	2589.4	1883	SI	0.4%	SI
4	2364	2600.4	1891	SI	-0.4%	SI
5	2355	2590.5	1884	SI	0.8%	SI
6	2374	2611.4	1899	SI	-0.7%	SI
7	2357	2592.7	1886	SI	-0.2%	SI
8	2353	2588.3	1882	SI	0.7%	SI
9	2369	2605.9	1895	SI	1.1%	SI
10	2395	2634.5	1916	SI	-0.5%	SI
11	2384	2622.4	1907	SI	0.1%	SI
12	2386	2624.6	1909	SI	0.0%	SI
13	2386	2624.6	1909	SI	-0.3%	SI
14	2378	2615.8	1902	SI	-0.8%	SI
15	2358	2593.8	1886	SI	1.0%	SI
16	2381	2619.1	1905	SI	0.0%	SI
17	2382	2620.2	1906	SI	0.5%	SI
18	2394	2633.4	1915	SI	0.2%	SI
19	2398	2637.8	1918	SI	0.3%	SI
20	2405	2645.5	1924	SI	-0.6%	SI
21	2390	2629.0	1912	SI	0.0%	SI
22	2390	2629.0	1912	SI	0.6%	SI
23	2405	2645.5	1924	SI	-0.6%	SI

Tabla II-4: (Continuación) Análisis de resultados de ensayos a celda patrón

24	2391	2630.1	1913	SI	0.4%	SI
25	2400	2640.0	1920	SI	-0.5%	SI
26	2389	2627.9	1911	SI	0.6%	SI
27	2403	2643.3	1922	SI	-1.0%	SI
28	2379	2616.9	1903	SI	0.5%	SI
29	2392	2631.2	1914	SI	-0.2%	SI
30	2387	2625.7	1910	SI	-0.1%	SI
31	2384	2622.4	1907	SI	0.5%	SI
32	2397	2636.7	1918	SI	-0.8%	SI
33	2379	2616.9	1903	SI	-0.3%	SI
34	2371	2608.1	1897	SI	0.6%	SI
35	2386	2624.6	1909	SI	0.5%	SI
36	2399	2638.9	1919	SI	-1.8%	SI
37	2356	2591.6	1885	SI	0.2%	SI
38	2361	2597.1	1889	SI	0.4%	SI
39	2370	2607.0	1896	SI	-0.1%	SI
40	2368	2604.8	1894	SI	-0.2%	SI
41	2364	2600.4	1891	SI	0.1%	SI
42	2366	2602.6	1893	SI	-0.1%	SI
43	2363	2599.3	1890	SI	-0.2%	SI
44	2358	2593.8	1886	SI	-0.3%	SI

De los resultados expuestos en los puntos 2.2.5 y 2.2.6 se desprende que el equipo de ensayo tiene una excelente repetibilidad. Por lo tanto, la variabilidad en los resultados sólo está asociada a la variabilidad propia de la mezcla asfáltica confeccionada.

2.3. Metodología Experimental

2.3.1. Diseño experimental

En este punto se describe el diseño experimental desarrollado para analizar el comportamiento del módulo para las mezclas asfálticas en caliente. Este diseño considera realizar una medición periódica de módulo a 15°C a probetas fabricadas en laboratorio, con objeto de analizar su comportamiento en el tiempo. El tiempo entre una medición y otra es aleatorio.

Por otro lado, se realizó medición de modulo a 25°C al final del estudio a un grupo de probetas, para evaluar el efecto de la temperatura. El estudio considera además la medición de módulo a 15°C a testigos de pavimento, de modo de analizar la diferencia entre mediciones a testigos de pavimento y probetas de laboratorio.

Tabla II-5: Matriz factorial para el estudio de laboratorio

Tipo mezcla	Ensayo	Temperatura de Ensayo
1 a 9	Medir periódicamente	15 °C
3	Al final del estudio	25°C
Testigos	Medir a la edad de extracción	15°C
Testigos	Medir a la edad de extracción	25°C

2.3.2. Variables del diseño

Las variables de diseño son dos: a) La variable dependiente es el Módulo de Rigidez, y b) Las variables independientes son: Edad de la mezcla (n° de días desde su fabricación), Compactación de la mezcla (N° de golpes para fabricar la probeta), y Temperatura de ensayo.

Con respecto al espacio de inferencia, se analizaron 10 tipos de mezclas, todas correspondientes a Carpeta asfáltica. De ellas, tres corresponden a la mezcla granulométrica dentro de la banda IV-12, y siete corresponden a la banda IV-A-12.
La Temperatura de Ensayo es de 15° C en la primera etapa, y 25° C para la segunda etapa (Sólo para mezcla tipo 3).

En lo referente a cantidad de réplicas , para los ensayos de laboratorio se realizan 2 ensayos por probeta (El segundo se realiza girando al probeta en 90ºC con respecto a la primera medición), y 8 probetas por cada tipo de mezcla.

Para los testigos de pavimento se extrajeron al menos tres por cada camino estudiado.

2.3.3. Metodología de fabricación y análisis de probetas

Se fabricaron Probetas Marshall, de acuerdo a 8.302.40 del Volumen n°8 del Manual de Carreteras (Ver **Punto2.8**).
La toma de datos se realizó con el equipo NAT. El funcionamiento de este quipo se encuentra explicado en **2.5.**
Para analizar los datos se requiere conocer la tendencia que presentarán en el tiempo. Sin embargo, intentar obtener un modelo de regresión no tendría sentido, ya que los resultados en los primeros días de la mezcla presentan una gran variabilidad. Por lo tanto, el análisis consistió en determinar la evolución de la variabilidad de los resultados en el tiempo para las mezclas estudiadas. De este modo, se analiza la tendencia de los resultados, y se agrupan los valores obtenidos para cierto rango de edad de la mezcla. A estos datos agrupados se le determina la varianza, desviación

estándar, y coeficiente de variación. Así se puede evaluar el comportamiento del módulo de la mezcla a medida que el asfalto se va envejeciendo, y se puede comprobar si la variabilidad en los resultados disminuye en el tiempo. Por otro lado, se determinó el valor de modulo al que tienden estas mezclas en el tiempo.

2.4. Resultados

2.4.1. Probetas Marshall

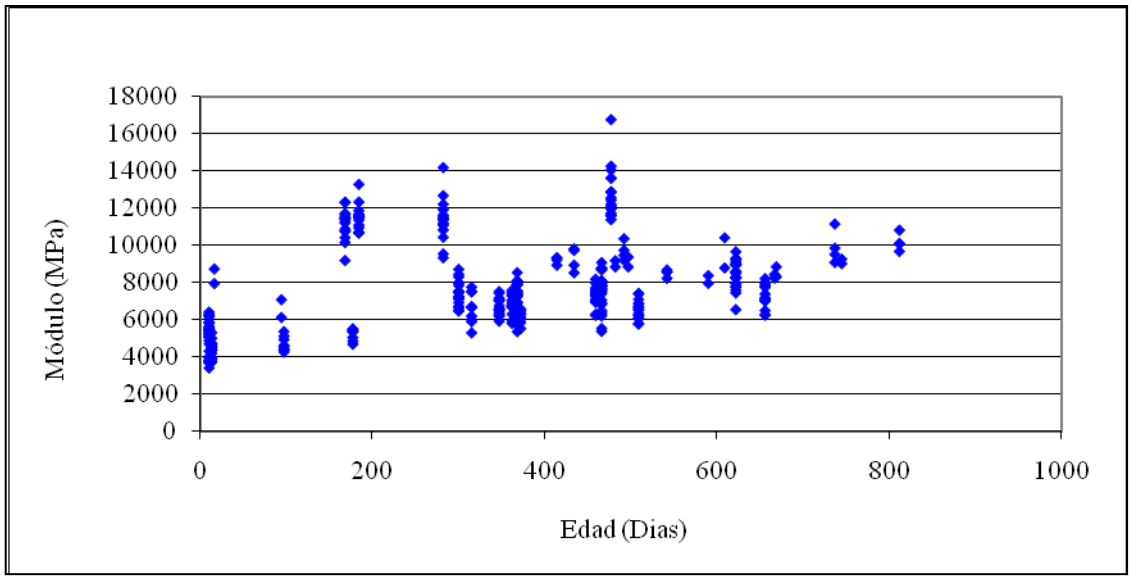

Figura 2-12: Resultados de mediciones de Módulo de Rigidez a probetas de laboratorio con método EN 12697-26 (2003), Anexo C

De este gráfico se aprecia una tendencia en cuanto a la evolución del módulo en el tiempo. Sin embargo, se aprecian algunos valores que se escapan del resto y aumentan la dispersión. Para evaluar la causa de esta dispersión, se presenta en la **Figura 2-13** el gráfico de los módulos identificados por el tipo de mezcla.

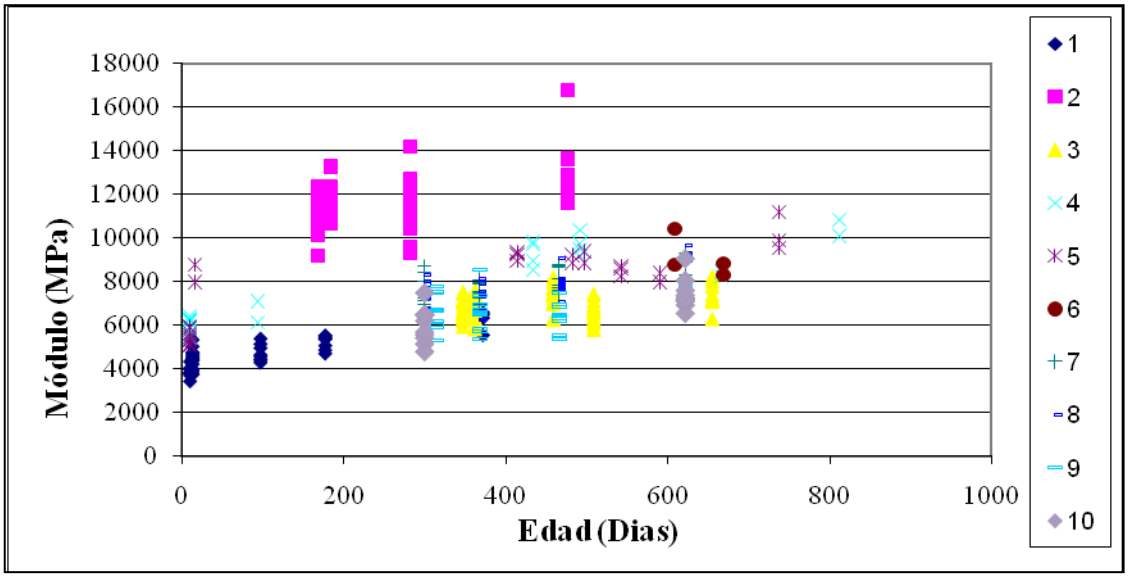

Figura 2-13: Resultados de mediciones de módulo de rigidez a probetas de laboratorio con método EN 12697-26 (2003), Anexo C, Ordenados por tipo de muestras

De este gráfico se aprecia que para todas las mezclas, excepto la Nº2, existe una tendencia en el valor de módulo hacia un cierto rango. Por otro lado, la variabilidad que se aprecia es muy baja, y se debe a la variabilidad propia de la fabricación de las probetas.

Cabe destacar que la mezcla N°2 corresponde a una mezcla no convencional. Esta mezcla en particular corresponde a una mezcla de alto modulo, por lo que, claramente el valor de módulo de rigidez para un mismo instante es distinto al resto, no así su comportamiento en cuanto a la evolución del modulo, en el período evaluado.

En la **Figura 2-14** se presenta el comportamiento del módulo, expresado como la tendencia del promedio de las probetas.

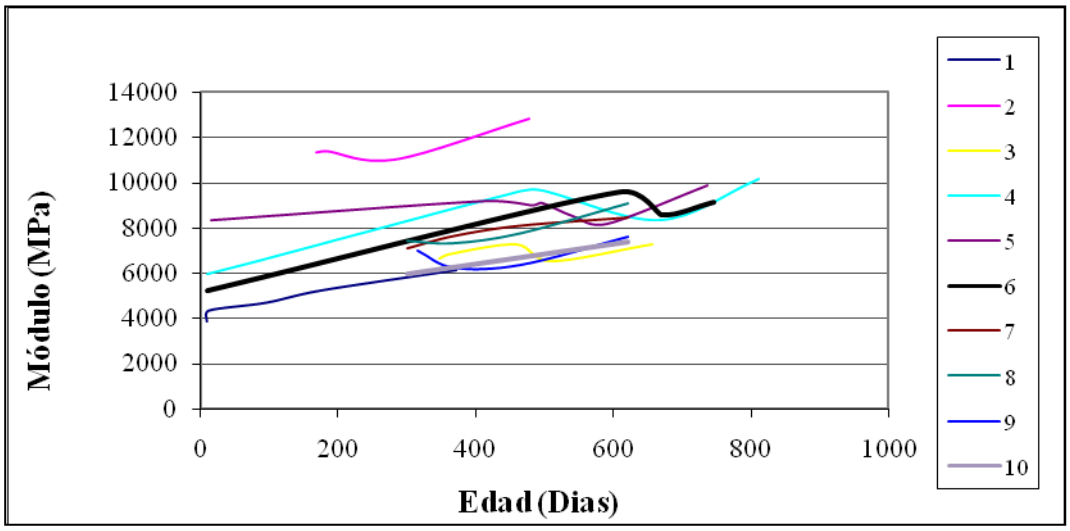

Figura 2-14: Resultados promedio de mediciones de módulo a probetas con método EN 12697-26 (2003), Anexo C.

Del gráfico de la **Figura 2-14** se aprecia que todas las muestras presentan una variación en el valor de módulo, pero en el tiempo este valor tiende a estabilizarse. Por otro lado, cada tipo de muestra tiene una ecuación de regresión distinta para el período analizado, debido a que cada mezcla evoluciona a partir de un distinto valor inicial. Sin embargo, todas tienden a un valor de módulo entre 8.000 y 10.000 MPa a los dos años, a excepción de la mezcla N°2 (De alto módulo), que sin embargo presenta un comportamiento similar, pero con valores más altos.

2.4.2. Testigos de pavimento

2.4.2.1. Ruta G-78

Tabla II-6: Determinación de módulo a testigos de pavimento Ruta G-78 (Edad:10 días)

Ubicación	Testigo	Ensayo 1 (Diámetro 1)	Ensayo 2 (Diámetro 2)	MR Testigo	MR Km	Densidad Testigo
		MR	MR			
[Nº]	[Nº]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	Kg/m^3
KM 13050 pista 2	1	3.951	3.662	3.807	3.669	2.305
	2	3.426	3.638	3.532		2.280
KM 13080 pista 2	1	4.179	3.978	4.079	3.961	2.324
	2	3.819	3.867	3.843		2.312
KM 13150 pista 2	1	4.396	4.673	4.535	3.984	2.312
	2	3.364	3.501	3.433		2.291
Promedio	-----	-----	-----	-----	**3.871**	**2.304**

De esta tabla se aprecia que el módulo de un testigo de pavimento, que fue compactado en terreno hasta alcanzar la misma densidad de la probeta de laboratorio, es menor a la obtenida por una probeta. Esto puede deberse a que al extraer el testigo, la broca corta el agregado, alterando la superficie del manto lateral. Lo mismo sucede con la base del testigo, la cual también es aserrada.

Tabla II-7: Determinación de módulo a probetas de laboratorio Ruta G-78 (Edad:10 días)

Tramo	**Densidad**	**MR [MPa]**
	Kg/m^3	**T = 15 [ºC]**
KM 12800 pista 1	2.312	5.466
KM 12860 pista 1	2.293	5.107
KM 12980 pista 2	2.314	5.950
KM 13050 pista 2	2.312	5.412
KM 13080 pista 2	2.316	5.813
Promedio	**2.309**	**5.550**

Al comparar los módulos para probetas y testigos a una misma edad (10 días), se puede obtener la siguiente relación:

K = Módulo testigo / Módulo probeta (14)

Luego,

$$K = \frac{3.871}{5.550} = 0,7$$

2.4.2.2. Vicuña Mackenna

Se extrajeron trozos de pavimento de la avenida Vicuña Mackenna esquina Santa Isabel. Este pavimento tiene una edad aproximada de 20 años.

Figura 2-15: Trozo de pavimento Avenida Vicuña Mackenna

Se tomó una muestra y se le realizó un ensayo de extracción asfáltica con granulometría, obteniéndose los siguientes resultados:

- Contenido de cemento asfáltico (%) = 6,1
- Granulometría: Banda IV-12

Tabla II-8: Granulometría de la muestra de pavimento Avenida Vicuña Mackenna

Tamiz	% Pasa
3/4´´	100
1/2´´	99
3/8´´	91
Nº4	65
Nº8	46
Nº30	18
Nº50	9
Nº100	3
Nº200	0,3

Del análisis granulométrico se concluye que esta mezcla corresponde a la banda IV-12, la cual corresponde a la banda granulométrica que típicamente se utilizaba hace 20 años para las carpetas asfálticas.

De este trozo de pavimento se extrajeron testigos, los cuales al ser analizados 15°C entregaron los siguientes resultados:

Tabla II-9: Módulo de rigidez de testigos extraídos de Avenida Vicuña Mackenna

Testigo nº	Modulo 1 (MPa)	Modulo 2 (MPa)	Promedio (MPa)
1	5.886	5.844	5.865
2	5.614	5.355	5.485
3	5.828	5.574	5.701
Promedio	**-----**	**-----**	**5.684**

Luego, utilizando la relación anterior se puede estimar el valor de módulo de una probeta, este es:

Módulo probeta = 5.684/0,7 = 8.120 MPa

Este valor se encuentra dentro del rango de valores a los que tienden las probetas de las mezclas de laboratorio estudiadas.

2.5. Análisis de datos

2.5.1. Variabilidad

Dado que se trata de muestras que han sido analizadas en cuanto a su evolución en el tiempo, se podría intentar obtener una ecuación de regresión, tanto para cada tipo de muestra en particular como para el total de las muestras. Sin embargo, estas ecuaciones presentarían una correlación muy baja, debido a que en los primeros meses la dispersión es muy alta. De esta forma, se decidió trabajar con los datos de todas las mezclas, y analizar su evolución, en lo referente a variabilidad de resultados, semestralmente. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla II-10: Análisis de variabilidad en módulos para el total de mezclas de laboratorio estudiadas

Promedio Módulo de Rigidez (MPa)	**Desviación Estándar**	**Coeficiente Variación**	**Semestre**	**N° Mediciones**
6.223	2.581	41,5	Primero	84
8.249	2.282	27,7	Segundo	104
8.075	2.080	25,8	Tercero	136
8.011	974	12,2	Cuarto	62
9.859	706	7,2	Quinto	10

De esta tabla se aprecia que la variabilidad en los resultados obtenidos de todas las muestras (incluida la muestra N°2) disminuye en el tiempo, lo que se refleja en la evolución semestral de la desviación estándar y el Coeficiente de Variación. Esto indica que los valores de módulos tienden a un cierto valor en el tiempo, independientemente del tipo de asfalto utilizado, bajo las condiciones de ensayo de esta investigación.

Para analizar la variabilidad de los resultados de las mezclas convencionales, se realizó el mismo análisis, exceptuando la mezcla N°2.

Tabla II-11: Análisis de variabilidad en módulos para mezclas estudiadas, exceptuando la mezcla N° 2

Promedio Módulo de Rigidez (MPa)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación	Semestre	N° Mediciones
5.061	957	18,9	1	68
6.835	771	11,3	2	72
7.439	1.096	14,7	3	120
8.011	974	12,2	4	62
9.859	706	7,2	5	10

De esta tabla se puede apreciar que, a pesar de que las mezclas consideradas corresponden a distintos diseños, con diferentes porcentajes de asfalto, la variabilidad propia de esas diferencias de diseño varía levemente en el tiempo, lo cual indica que la evolución del módulo para cada tipo de mezcla es similar. Esto confirma la hipótesis de que el módulo aumenta en el tiempo, y demuestra que para mezclas convencionales, el módulo de rigidez varía dentro de rangos definidos, en el tiempo.

2.5.2. Análisis de Módulo según grado de compactación

En los gráficos de las **Figuras 2-16 y 2-17** se presenta la evolución de módulo para probetas de las mezclas tipo 7, 8, 9 y 10. Las probetas de las mezclas Nº 7 y N° 10 fueron confeccionadas con 50 golpes por cara, y las de las mezclas N° 8 y N° 9, con 75 golpes por cara. La **Figura 2-16** presenta la evolución en escala real, y la **Figura**

2-17 presenta un acercamiento, para verificar visualmente las diferencias entre cada medición.

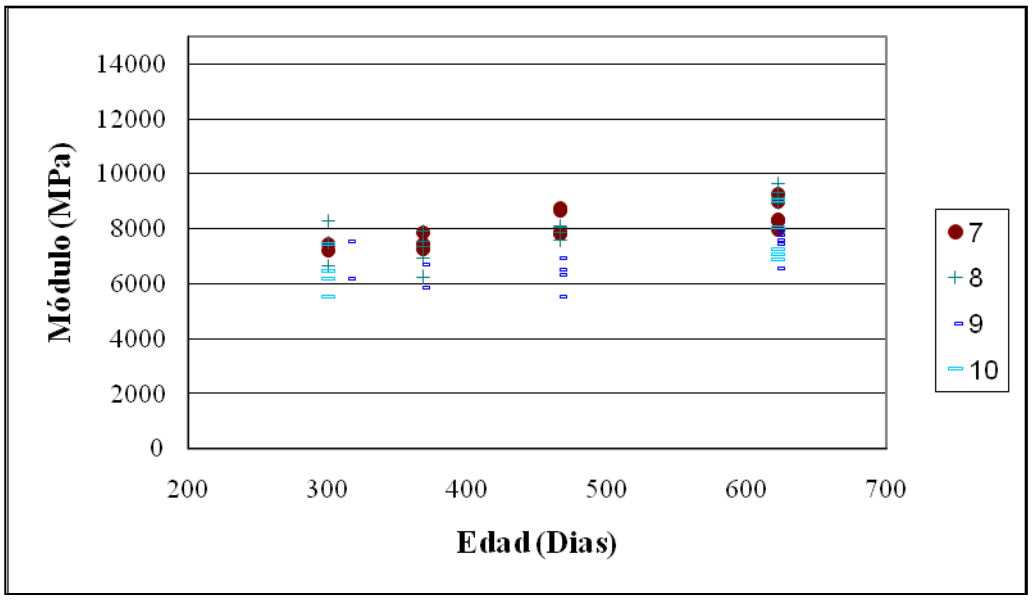

Figura 2-16: Comparación de evolución del módulo de Rigidez para probetas con distintos grados de compactación

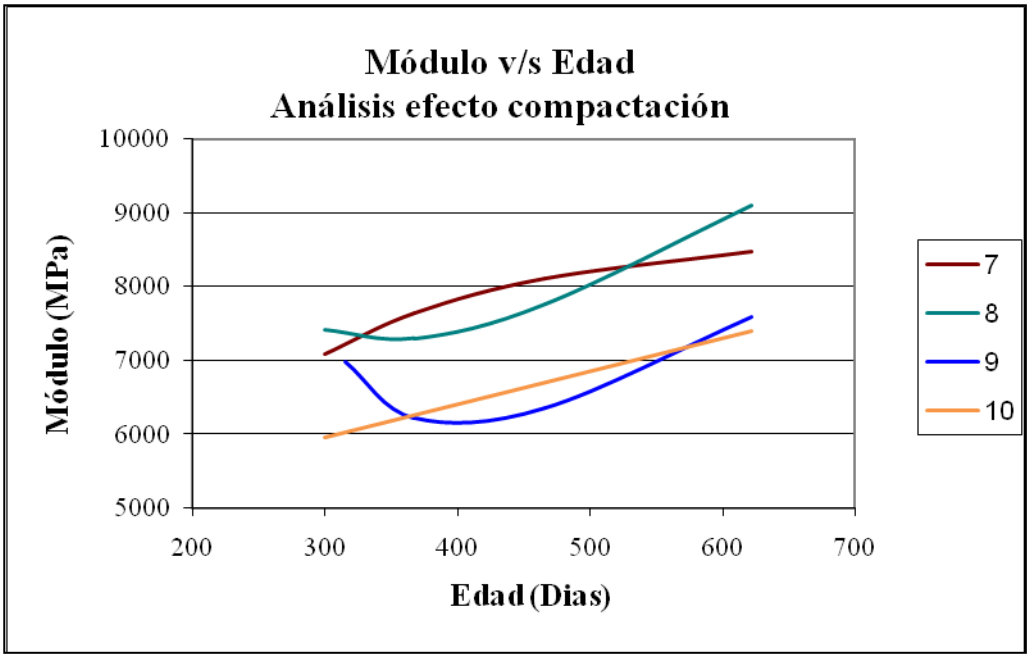

Figura 2-17: Comparación de módulo de Rigidez para probetas con distintos grados de compactación (Acercamiento)

De estos gráficos se aprecia que el módulo no se ve afectado por el grado de compactación entre 50 y 75 golpes por cara para probetas Marshall. Esto demuestra que en la práctica se puede tener un pavimento con densidades que varíen dentro de un rango aceptable, y el valor del módulo no se verá afectado significativamente.

2.5.3. Contrastación de resultados con Método Mecanicista

Se contrastaron los resultados de módulo de rigidez obtenidos en laboratorio para dos mezclas convencionales, con lo que se obtiene de las curvas del método de diseño Shell. Este método mecanicista de diseño, desarrollado por Shell en 1963, es una herramienta mediante la cual se pueden realizar diseños de espesores para estructuras de pavimentos asfálticos. Dentro de las etapas de diseño, considera la determinación del módulo de rigidez del asfalto, y a partir de este resultado, obtiene el módulo de rigidez de la mezcla.

Para la determinación del módulo de rigidez (S*tiffness*) del asfalto a la temperatura de trabajo en obra, el método emplea la gráfica de *Van Der Poel* (**Figura 2-18)**. Para ello es necesario conocer la siguiente información:

- Índice de penetración
- Tiempo de aplicación de carga. Para el caso de esta investigación, se consideró un tiempo de 0,124 segundos.
- Diferencia entre punto de ablandamiento y temperatura de la mezcla, entendida como $\Delta T = T800 — T\ mezcla$.

donde:

T800 = Punto de Ablandamiento del asfalto (°C)

T mezcla = Temperatura de la mezcla (°C), la cual es función de la temperatura ambiente. Esta se obtiene de la gráfica presentada en la **figura 2-18.**

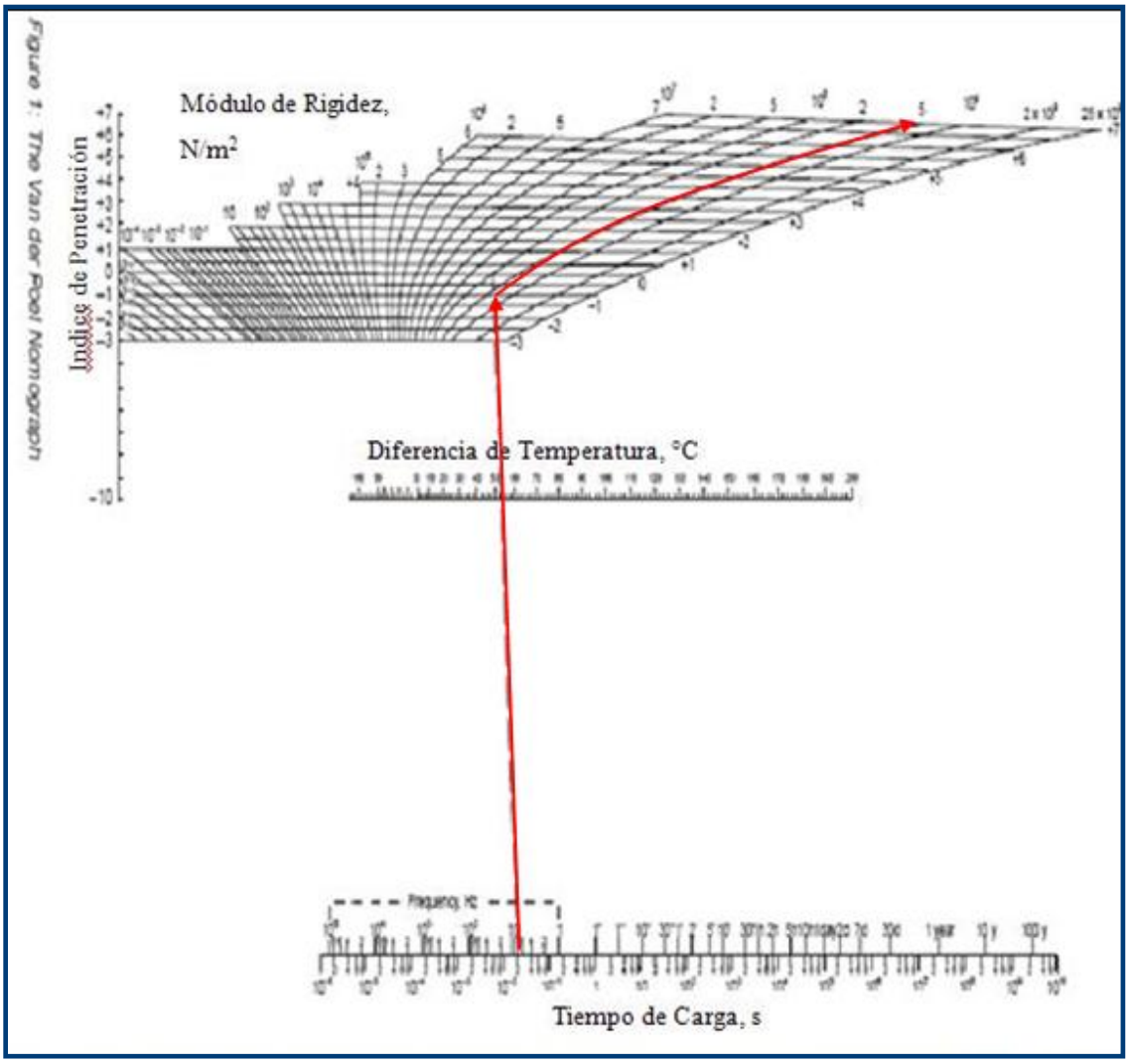

Figura 2-18: Nomograma de Van der Poel (Fuente: Shell Pavement Design Manual, 1998)

Para la Determinación del módulo de rigidez (*Stiffness*) de la mezcla asfáltica se emplea la gráfica de *Heukelom* (**Figura 2-19**) y para ello es necesario conocer, además del *Stiffness* del asfalto, la composición volumétrica de la mezcla asfáltica de

acuerdo con el diseño de ella en el laboratorio, que para el caso de esta investigación es el método Marshall.

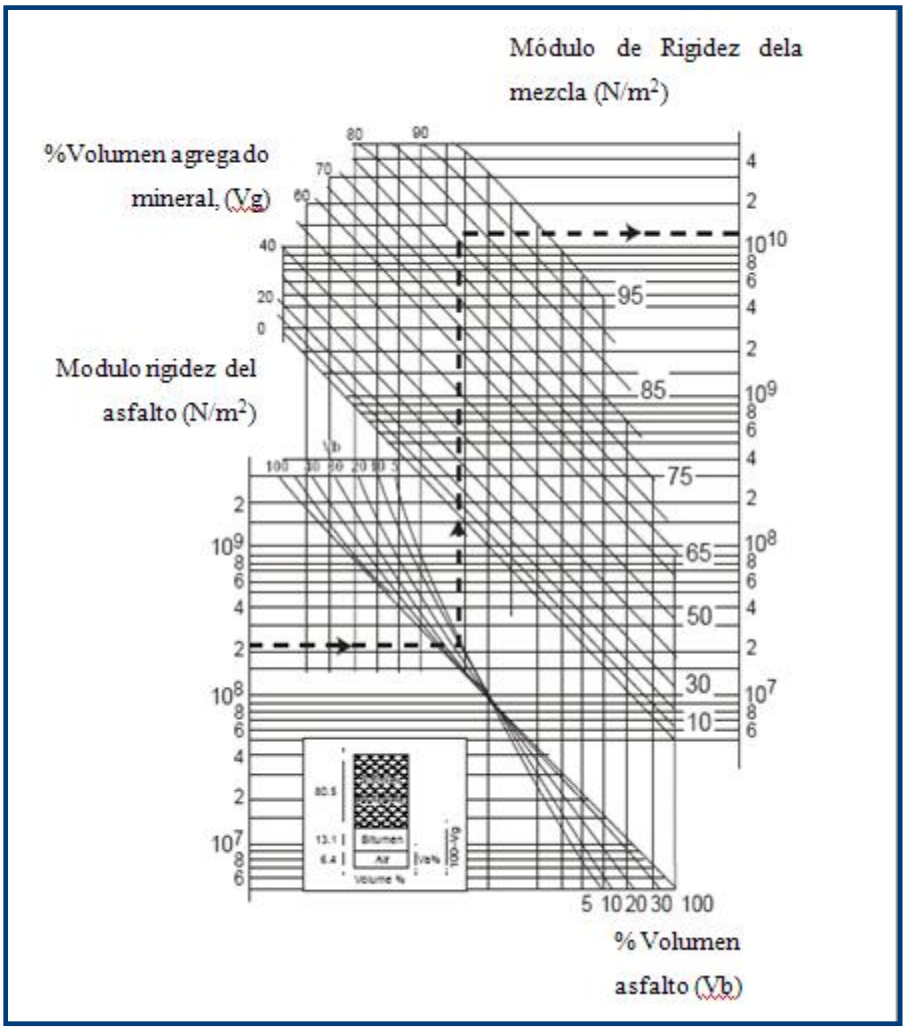

Figura 2-19: Gráfica de Heukelom para determinar el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (Fuente: Shell Pavement Design Manual, 1998)

Para este análisis, existen en el mercado *Softwares* que permiten calcular con gran exactitud el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica. Ellos se basan en las dos gráficas presentadas en las **Figuras 2-18 y 2-19**.

Los datos de entrada y resultados tanto para la obtención del módulo de rigidez de los Cementos Asfálticos utilizados, como para las mezclas compactadas se presentan en las **Tablas II-12 y II-13**:

Tabla II-12: Determinación teórica del módulo de Rigidez de dos Cementos Asfálticos, basado en Nomograma de Van der Poel

Parámetro	**Valor CA 1**	**Valor CA 2**
Tiempo de carga (seg)	0,124	0,124
Temperatura (C)	15	15
Punto de Ablandamiento (°C)	51	50
Índice de Penetración	-0,91	-0,7
Módulo Rigidez Asfalto (MPa)	27,3	18,6

Tabla II-13: Determinación teórica del módulo de la mezcla asfáltica para cada Cemento Asfáltico, utilizando Gráfica de Heukelom

Parámetro	**Valor CA 1**	**Valor CA 2**
Módulo Rigidez del Asfalto (MPa)	27,3	18,6
Porcentaje en Volumen de Asfalto (%v/v)	11	11
Porcentaje en Volumen de Agregado (%v/v)	84	84
Porcentaje de Vacíos (%v/v)	5,0	5,0
Módulo Rigidez Mezcla (MPa)	4.140	3.230

Con respecto a la **Tabla II-13**, cabe mencionar que el contenido de asfalto está expresado en porcentaje de volumen.

De la **Tabla II-12** se aprecia que el módulo de rigidez del asfalto en este caso es 27,3 y 18,6 MPa, respectivamente. De la **Tabla II-13** se aprecia que el porcentaje de vacíos en la mezcla (Porcentaje volumétrico) es de 5,0%, y que el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica es 4.140 MPa y 3.230 MPa, respectivamente.

Los ensayos realizados en laboratorio entregan un módulo de rigidez de 5.719 MPa a los 60 días para la mezcla con CA1, y 6.662 MPa a los 347 días para CA 2. Por otro lado las mezclas convencionales estudiadas en la sección anterior tienen

módulos de rigidez inicial entre 4.000 MPa y 8.000 MPa, por lo cual se concluye que el módulo de rigidez que entrega el método Shell es conservador.

2.5.4. Análisis de Módulo v/s Temperatura

Se analizó la diferencia entre el módulo medido a 15°C y a 25°C para probetas recién fabricadas, y para probetas con más de 500 días. Además, se realizó el mismo procedimiento para tres testigos obtenidos de un pavimento construido hace 20 años. Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla II-14: Módulo de Rigidez a 15°C y a 25°C para probetas fabricadas en laboratorio de contrato Ruta G-78. (Probetas recién fabricadas)

Probeta	**MR [MPa]**		**Diferencia (MPa)**
	T = 15 [ºC]	**T = 25 [ºC]**	
1	5.466	1.655	3.810
2	5.107	1.470	3.638
3	5.950	1.922	4.028
4	5.412	2.042	3.370
5	5.813	2.093	3.721
Promedio	-----	-----	3.713

Tabla II-15: Módulo de Rigidez a 15°C y a 25°C para probetas fabricadas en laboratorio (Mezcla n° 3) después de más de 500 días de fabricadas

Edad (Días)	**509**	**527**	**Diferencia (MPa)**
Probeta	**Modulo 15°C (MPa)**	**Modulo 25°C (MPa)**	
1	6.770	2.865	3.905
2	7.266	3.399	3.867
3	6.081	2.738	3.344
4	7.142	3.481	3.661
5	6.635	2.830	3.806
6	5.799	2.471	3.328
7	6.234	2.552	3.683
8	6.452	2.638	3.815
Promedio	-----	-----	**3.676**

Tabla II-16: Módulo de Rigidez a 15°C y a 25°C para testigos de pavimento Vicuña Mackenna- Santa Isabel (Edad aproximada pavimento: 20 años)

Testigo	Modulo 25°C (MPa)	Modulo 15°C (MPa)	Diferencia (MPa)
1	5.865	3.101	2.765
2	5.485	2.738	2.747
3	5.701	3.008	2.693

De las **tablas II-14 y II-15** se aprecia que el valor del módulo sigue dependiendo de la temperatura, pero que además, la diferencia entre el módulo de rigidez a 15°C y a 25°C, con este método de ensayo, permanece y no tiene una gran variación en el tiempo:

- Diferencia promedio probetas recién fabricadas: 3.713MPa
- Diferencia promedio probetas con más de 500 días: 3.676MPa
- Diferencia promedio Testigos de pavimento: 2.735MPa

Para el caso de los testigos de pavimento (**Tabla II-16**), se aprecia que la magnitud de la diferencia es un poco menor, esto puede ser atribuible a que este pavimento es mucho más antiguo que las otras dos mezclas por lo tanto su susceptibilidad térmica es menor.

De esto se concluye que la diferencia entre el módulo a 15°C y a 25°C tiende a disminuir en el tiempo, es decir, el módulo se hace menos susceptible a la temperatura. Sin embargo, esta disminución es pequeña.

CAPITULO III: MEDICION EN TERRENO

3.1. Métodos de Ensayo

Existe una gran variedad de métodos para determinar el módulo en un pavimento asfáltico en terreno. En este estudio se considerarán los siguientes métodos:

- Instrumentación de pavimento (**Anexos 3 y 4**)
- Deflectometría de Impacto (**Anexo 5**)

Existe en el mercado una amplia variedad de equipos de instrumentación. La mayoría de ellos se basa en el principio de medición con *Strain Gages* (**Anexo 3**). La descripción detallada de los principales tipos de instrumentos utilizados para capas granulares, asfálticas y de Hormigón, se encuentra en el **Anexo 4.**

Luego de una minuciosa investigación sobre cada uno de los tipos, modelos y costos, fueron seleccionados los siguientes equipos para la instrumentación de pavimento de este estudio:

Tabla III-1: Equipos a utilizar en el estudio

Proveedor	Instrumento	Cantidad
Dynatest	Strain Gages para instrumentación de pavimento asfáltico, capaces de medir deformación horizontal (incluye el cableado necesario)	2
ETT	Datalogger para recolección de información	1
Massload	Escala para pesaje de rueda de camión, portátil	1
VETO	Termómetros para registrar temperatura en la capa asfáltica	2

Nota: La cantidad de *strain gages* utilizada en el presente estudio estuvo limitada por razones presupuestarias.

A continuación se presenta una descripción del funcionamiento de los equipos seleccionados para el estudio:

Strain Gages: HPAST II-AC10 (Horizontal PAvement Strain Transducer)

Se utilizan para la medición de deformación en capas asfálticas de un pavimento. Si bien es cierto, son conocidos como *strain gages*, en realidad el s*train gage* es sólo un componente (El principal) de este instrumento de medición.

Estos transductores tienen forma de "H" (**Figura 3-1**). Para uso en pavimentos es recomendable instalarlos en una posición horizontal, generalmente en el fondo de la capa asfáltica del pavimento. Con esto se puede medir la deformación longitudinal producida por las cargas de tránsito, la cual se utiliza como parámetro en diseño de pavimentos.

El transductor seleccionado para el estudio posee en su centro un *strain gage* completamente embebido en una tira de epóxico reforzada con fibra de vidrio, material con relativamente baja rigidez y alta flexibilidad y resistencia. Cada extremo de la tira epóxica está pegada a un anclaje de acero inoxidable para asegurar un enganche mecánico apropiado con el material de la capa asfáltica después de su instalación.

El *strain gage* tiene un recubrimiento que lo protege del deterioro químico y mecánico, y permite una resistencia a temperaturas entre -30ºC a 150ºC.

El transductor considerado en este estudio tiene una resistencia de 120 Ohm, y un factor de celda de 2,0.

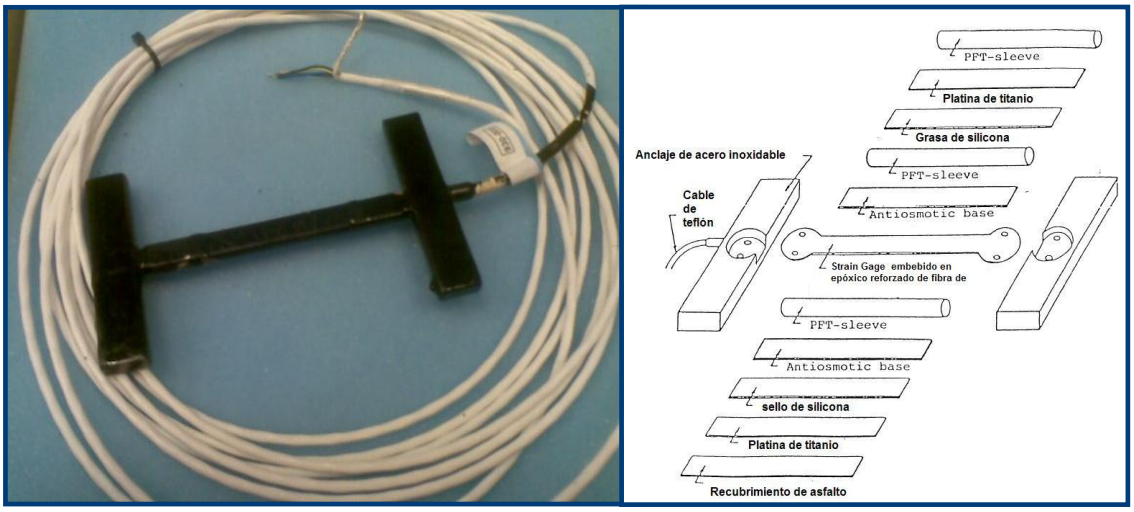

Figura 3-1: Strain Gage utilizado en el estudio y diagrama de capas que lo componen

Los *Strain Gages* utilizados en este estudio son de ¼ de puente, por lo tanto, para realizar mediciones compensando el efecto de la temperatura se requiere de un adaptador, o en su defecto fabricar un módulo con resistencias de 120 Ohm. En la **Figura 3-2** se presenta una explicación de cómo conectar los cables de los *strain gages* utilizados. En este caso, el cable amarillo debe ser cortado y sellado con cinta aislante:

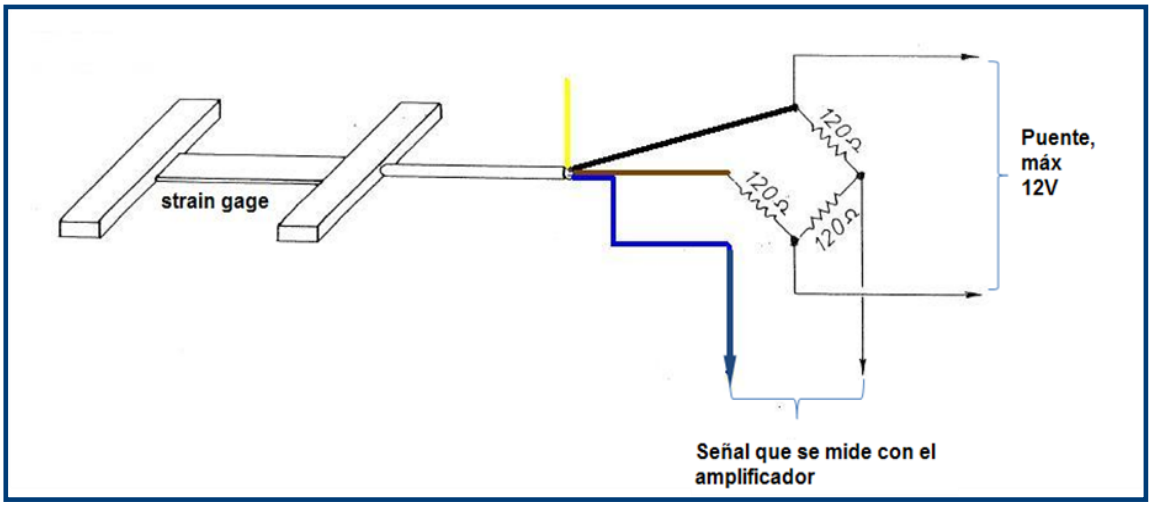

Figura 3-2: Diagrama de conexión de los cables del Strain Gage para su lectura con datalogger

Salida: Puente* Ampf *0,5*10^{-6} = 1 microstrain (3.1)

$$\mu strain = \frac{Salida(mV)}{Puente \times Amplificación \times 0.5 \times 10^{-3}} \quad (3.2)$$

Datalogger

Este equipo permite captar las señales del *Strain Gage*, y entregar directamente el valor de deformación medido, expresado en *microstrain*. De esta forma, se hace mucho más fácil para cualquier usuario el uso de instrumentación. Además, utiliza un software que permite capturar en tiempo real la señal que emite el *strain gage*.

Figura 3-3: Datalogger utilizado para la investigación

En caso de utilizar este *Datalogger*, se puede utilizar un adaptador para cable tipo RJ50, proporcionado por el fabricante (**Figura 3-4**), en vez de hacer el adaptador descrito anteriormente:

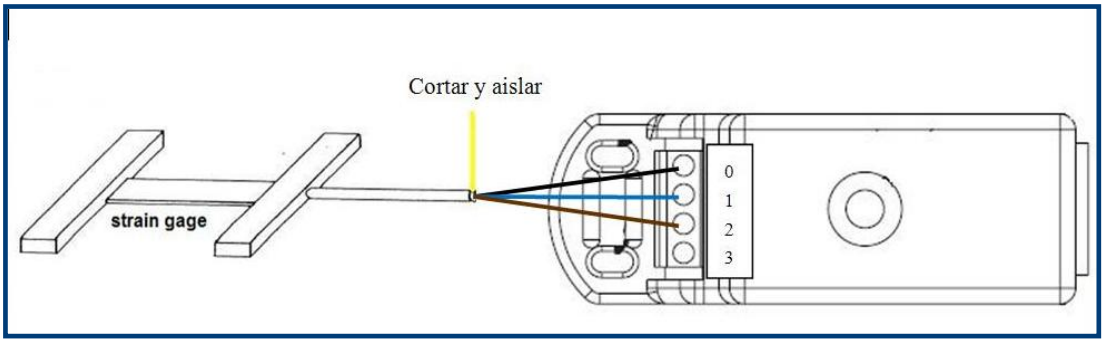

Figura 3-4: Diagrama de conexión del Strain Gage con el **a**daptador para cable RJ50

Escala para pesaje

Este equipo corresponde a un sistema de pesaje móvil de camiones, lo que permite determinar el peso exacto de la rueda, y de este modo poder controlar dicha variable, en el caso de que la medición se realice con un vehículo en movimiento.

Figura 3-5: Balanza para Pesaje móvil considerada para el estudio

Termómetros

Los termómetros utilizados deben ser capaces de medir temperaturas entre 0 y 200°C. Además, se requieren termómetros ambientales.

Deflectómetro de Impacto

Este es un equipo diseñado para medir Módulo por deflectometría de impacto. Existen varios tipos de Deflectómetro de impacto, los cuales se describen en detalle en el **Anexo 5**. Para esta investigación, se optó por trabajar con el equipo *Falling Weigth Deflectómeter* (FWD), dado su uso masivo en Chile y confiabilidad en sus resultados.

La principal característica del FWD es que es un instrumento para la medición de la capacidad de carga de las capas de pavimentos.

Figura 3-6: Medición de deflectometría en el tramo de prueba con equipo FWD

3.1.1. Estudios de Instrumentación de Pavimento

En el mundo existen muchos estudios de instrumentación de pavimentos. Más aún, existen tramos especialmente construidos para ser instrumentados y estudiados. Los más importantes son:

MnROAD

El MnROAD (*Minnesota's Cold Weather Road Research Facility*), que depende del Departamento de Transportes de Minnesota (Mn/DOT). Se ubica cerca de Albertville, Minnesota, a 40 millas Noroeste de Twin Cities.

El MnROAD es un tramo de prueba, construido originalmente en 1994, que se utiliza para investigar materiales y pavimentos, con el fin de desarrollar caminos de mayor vida útil, mejor desempeño, menor costo de construcción y mantenimiento, mayor velocidad de construcción, y mínimo impacto ambiental. El MnROAD consiste en dos secciones de prueba principales, las cuales a su vez están divididas en 55 celdas, cada una de ellas con distintas combinaciones de materiales y diseños: La primera sección incluye tráfico de la autopista interestatal (Ruta I-94). La segunda sección consiste en un camino de bajo volumen de tránsito que simula las condiciones de un camino rural (en esta sección se tiene un camión con peso y velocidad controlados, que se hace circular periódicamente). Ambas secciones están equipadas con más de 8.000 sensores que registran las respuestas del pavimento a las cargas y además recolectan información de las condiciones ambientales. Esto ha permitido a la administración realizar un sinnúmero de investigaciones, en alianza con múltiples Universidades y Organismos de todo el mundo.

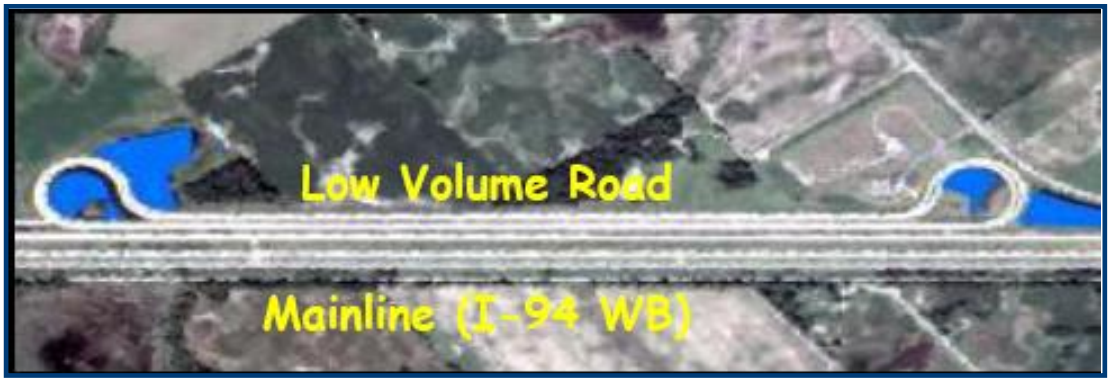

Figura 3-7: Mn Road Test (Fuente: Mn/ROAD)

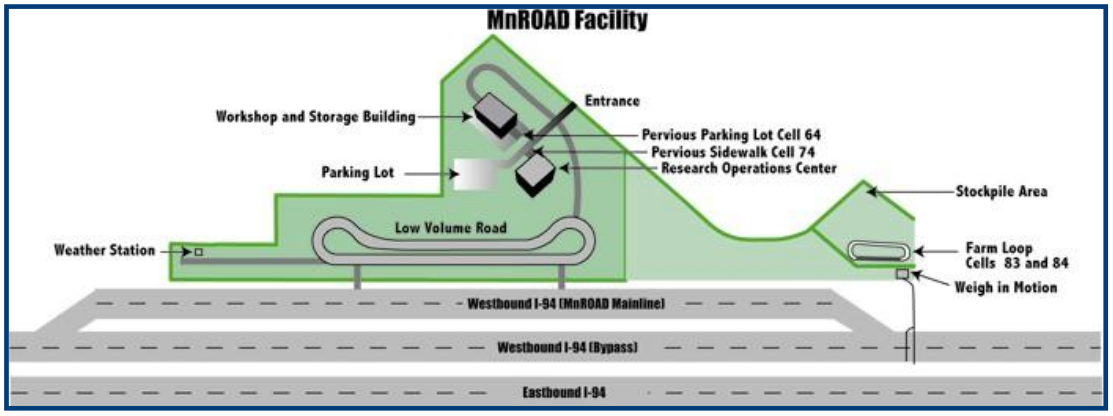

Figura 3-8: Layout del Mn Road Test (Fuente: Mn/ROAD)

Virginia Smart Road

El *Virginia Smart Road* es un camino, dependiente del Departamento de Transportes de Virginia, que conecta Blacksburg con la Interestatal 81, y sirve de enlace directo entre la Universidad más grande y la ciudad más grande del suroeste de Virginia. En la **Figura 3-9** se presenta el mapa de ubicación del Virginia Smart Road, destacado en color azul, en donde se puede apreciar la magnitud de este proyecto.

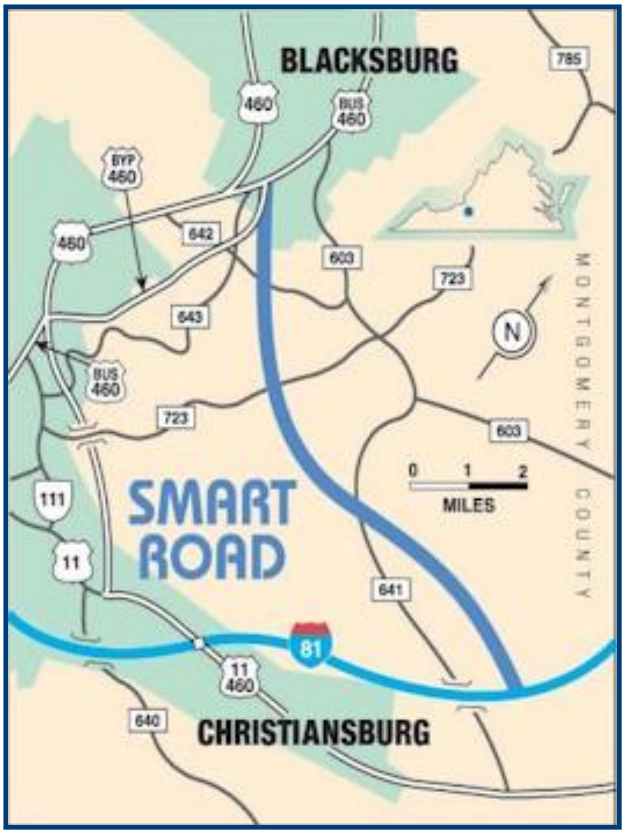

Figura 3-9: Ubicación del Virginia Smart Road Test, destacado en color azul (Fuente: Virginia Smart Road)

El Smart Road tiene tres propósitos, que son:

- Conectar Blacksburg con la Interestatal 81
- Ser una instalación para investigación pública y privada
- Ser un estímulo económico para el área.

Su infraestructura de investigación está incorporada en la carretera. Esto implica que la instrumentación de este tramo está sometida a tránsito real, por lo que las mediciones son muy realistas. Además, algunos sectores del Smart Road tienen implementados sistemas que permiten simular condiciones de tráfico, como por ejemplo, sectores con lluvia **(Figura 3-10)**.

Figura 3-10: Simulación de condición de Lluvia (Fuente: Virginia Smart Road)

La información recabada por medio de instrumentación de este camino está orientada a predecir el desempeño de los pavimentos en estudio.

Otros estudios

Existen también equipos de deterioro acelerado de pavimentos (APT por sus siglas en inglés *Accelerated Pavement Test*), que se utilizan en investigaciones y consideran la instrumentación del pavimento como medio para obtener datos. Cada APT posee diversas características, pudendo ser Móviles o Estacionarias, y Lineales o Circulares. Sin embargo, todas se orientan a simular el paso de vehículos, acelerando el deterioro del pavimento, y simulando de esta forma el desempeño que éste tendrá en el largo plazo.

Algunos de los APT más importantes son:

España: CEDEX

Consiste en una pista de prueba instrumentada, por la cual se hace pasar un carro con una carga que se puede variar. Este carro circula constantemente sobre la pista, acelerando de esta forma el deterioro de la misma, y permitiendo predecir el comportamiento del pavimento bajo estudio.

Figura 3-11: CEDEX en España (Fuente: CEDEX)

Sudáfrica: HVS (Heavy Vehicle Simulator, tipo Móvil- Lineal)

Esta instalación es de tipo móvil. Tiene el tamaño y forma de un camión. Se posiciona sobre el pavimento a estudiar y se hace pasar una rueda con un peso definido sobre el pavimento durante varios períodos de tiempo. Como resultado el pavimento estudiado se deteriora aceleradamente, pudiendo predecir en base a las mediciones realizadas con instrumentación el comportamiento que tendrá.

Figura 3-12: HVS en Sudáfrica (Fuente: Gauteng Department of Public Transportation, South Africa)

Nueva Zelanda: Captif (Tipo Estacionaria-Circular)

La diferencia entre este equipo y el HVS es que el HSV puede trasladarse a terreno mientras este equipo es estacionario. Por otro lado, al igual que el HVS esta instalación hace pasar una rueda sobre el pavimento estudiado, pero en este caso la pista es circular.

Figura 3-13: CAPTIF, Nueva Zelanda (Fuente: CAPTIF)

3.1.2. Normativas

En Chile prácticamente no existen experiencias en cuanto a instrumentación de pavimentos, por lo que no se han desarrollado normativas al respecto. Mucho menos existe un protocolo de instrumentación.

En general en el mundo, cada organismo que tiene un programa de investigación que incluye instrumentación de pavimentos, tiene su propio procedimiento Normalizado.

3.1.3. Descripción del ensayo

La instrumentación de pavimento consiste en colocar dispositivos de medición en la capa de pavimento a estudiar, ya sea durante su construcción, o una vez construido el pavimento. El objetivo es realizar mediciones al parámetro estudiado en terreno. Generalmente se mide temperatura, Humedad (Para capas granulares), tensiones y deformaciones en alguna o todas las capas que conforman la estructura del pavimento. En el caso particular de esta investigación, se medirá la deformación producto de la carga producida por el Deflectómetro de impacto (FWD), ya que es esta deformación la que se considera para el cálculo de módulo del pavimento.

Para este estudio se dispone de dos strain gages (HPAST). Originalmente estaba previsto realizar mediciones haciendo circular un camión sobre el pavimento instrumentado. Con la balanza móvil se podría conocer el peso exacto de la rueda del camión. Sin embargo, para poder obtener mediciones confiables, se requiere instrumentar el pavimento con más sensores. Por esto, se decidió realizar mediciones de Deflectometría de impacto utilizando el equipo FWD, y determinar si las mediciones obtenidas con ambos métodos son comparables.

3.2. Implementación del Ensayo

3.2.1. Infraestructura

Para esta etapa del estudio se utilizaron los equipos descritos en **3.1.1**. Dado que no se hicieron circular camiones sobre el pavimento, no fue necesario utilizar la escala para pesaje.

La estructura considerada es:

- Terraplén: Para el Terraplén se utilizó arena seleccionada, ya que el objetivo es tener una capa de relleno para asegurar homogeneidad. El espesor de esta capa es de 20cm.
- Base granular chancada de 30 cm de espesor, que corresponde a la capa típicamente utilizada en pavimentos asfálticos.
- Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor.

Figura 3-14: Estructura del tramo de prueba del estudio (Fuente: Elaboración Propia)

Las dimensiones del tramo consideradas son: una pista de 4 m de ancho y 10 metros de longitud.

Figura 3-15: Construcción del tramo de prueba

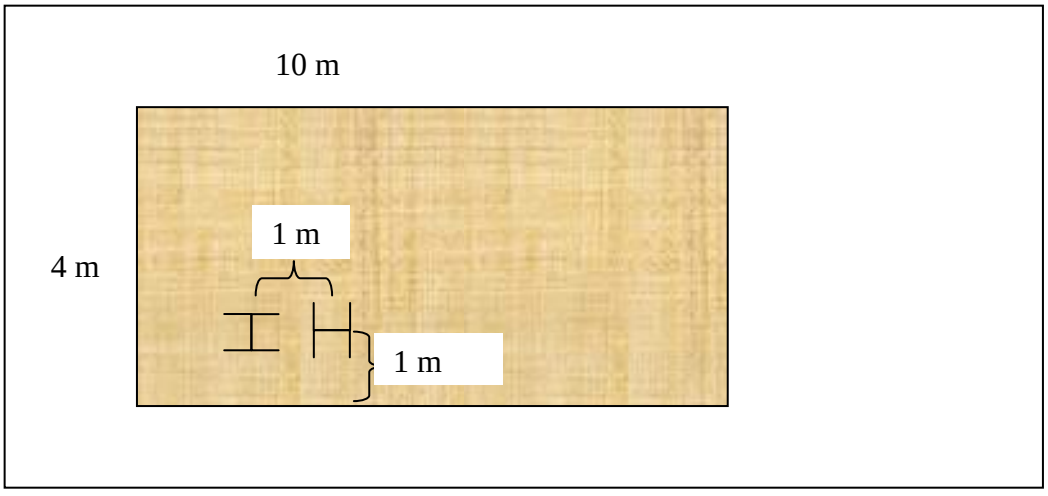

Figura 3-16: Ubicación de los Strain Gages en el tramo de prueba

3.2.2. Acondicionamiento del Equipo

La instrumentación fué colocada de acuerdo a lo presentado en el protocolo de colocación de *Strain Gages* (**Ver 4.5**).

Antes de realizar las mediciones, se posicionó el deflectómetro justo sobre la ubicación del *Strain Gage* (HPAST), de manera que las deflexiones medidas fuesen coincidentes en relación a la carga.

Las condiciones de medición en terreno fueron:

- Temperatura ambiente: 10°C
- Carga vertical aplicada por el deflectómetro de impacto: 50 KN
- Dos Strain Gages HPAST, ubicados a 1 metro de distancia entre sí (**figura 3-16**)

3.3. Metodología Experimental

3.3.1. Diseño Experimental

El diseño experimental en terreno considera hacer mediciones con Deflectometría de impacto en puntos sobre cada HPAST, y en un punto entre ambos. De esta forma, el diseño queda como sigue:

Tabla III-2: Diseño experimental de terreno

Punto		FWD	Instrumentación
		Deformación (u Strain)	Deformación (u Strain)
HPAST 1	N° mediciones	3	3
Intermedio		3	3
HPAST 2		3	3

3.3.2. Variables del diseño

Si bien es cierto, lo que se busca obtener al realizar una Deflectometría de impacto, o una medición con instrumentación es el módulo del pavimento, lo que miden estos equipos es la deformación que sufre la capa, producto de una carga aplicada. Luego, y en base a ecuaciones presentadas en el **Anexo 5**, se calcula el valor de módulo. Teniendo esto en consideración, se tiene que las variables de diseño son dos: La Variable de diseño dependiente es la deformación, expresada en microstrain, que sufre el pavimento producto de la carga aplicada. Las Variables de Diseño Independiente son: Temperatura, Velocidad de carga y magnitud de la carga aplicada.

Con respecto a la cantidad de réplicas, ara las mediciones con instrumentación se requieren tres mediciones. Para las mediciones por Deflectometría de impacto, se considerarán también tres mediciones.

3.3.3. Metodología de toma de datos

La toma de datos con Instrumentación en terreno se realizó utilizando el software del equipo. Con respecto a la posición de los *Strain Gages*, García (2007) indica que los *Strain gages* colocados en forma transversal al camino entregan deformaciones mayores que los *strain gages* colocados en forma longitudinal. En este caso, dado que se aplicará una carga puntual, el resultado es indistinto de la ubicación del transductor (Transversal o longitudinal).

La toma de datos con FWD se realiza de acuerdo a lo explicado en **Anexo 5**.

Dado que el objetivo es validar la utilización de instrumentación, la metodología de análisis de datos considera evaluar la variabilidad entre los resultados obtenidos mediante Deflectometría y mediante instrumentación.

3.4. Resultados

El día 29 de Julio de 2010 se realizaron mediciones con los Strain Gages (HPAST) al aplicar pulsos de carga de 50KN con el FWD sobre cada sensor en el pavimento, y en el punto medio entre ellos (50 cm). La **Figura 3-17** presenta la gráfica de mediciones obtenidas para cuatro pulsos aplicados. En este caso, el segundo pulso fue descartado, dado que corresponde a un valor atípico:

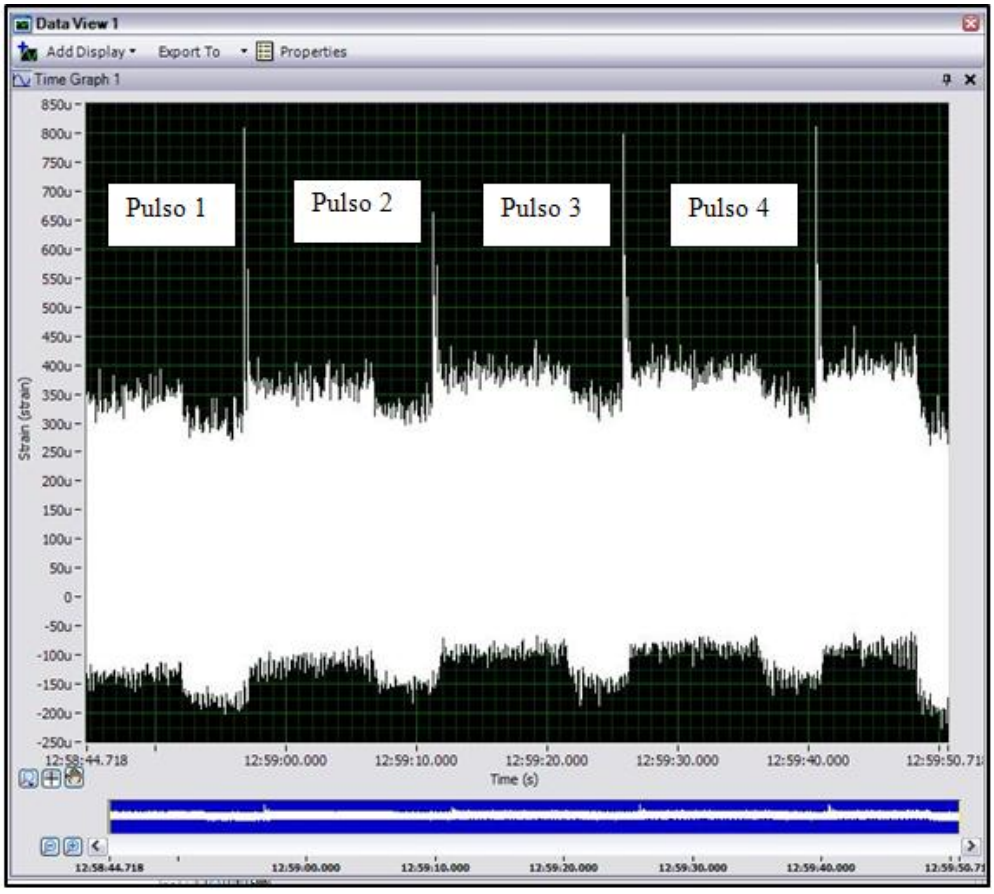

Figura 3-17: Medición de cuatro pulsos de carga aplicados por el FWD en el pavimento sobre un Strain Gage

Esta gráfica presenta en el eje “X” el tiempo, es decir: la Hora, minuto, segundo, y milésima de segundo en que fue tomado el dato. En el eje “Y” se presenta la deformación, expresada en *microstrain*.

De esta figura se aprecia que existe un ruido en la medición. Este ruido se produce a una frecuencia constante, cada 0,02 segundos. Esto se debe a la longitud de los cables, cuya resistencia eléctrica influye en la medición, y a la pérdida de aislación eléctrica que sufrió el cable de tierra (Amarillo en la **figura 3-4**). En todo caso este ruido tiene una frecuencia constante, y es independiente del pulso de carga aplicado, por lo cual es posible medir la deformación con los strain gages, a pesar de este ruido.

Para demostrar la forma de medición de la deformación, a modo de ejemplo, en la **Figura 3-18** se presenta un acercamiento a un pulso de carga aplicado.

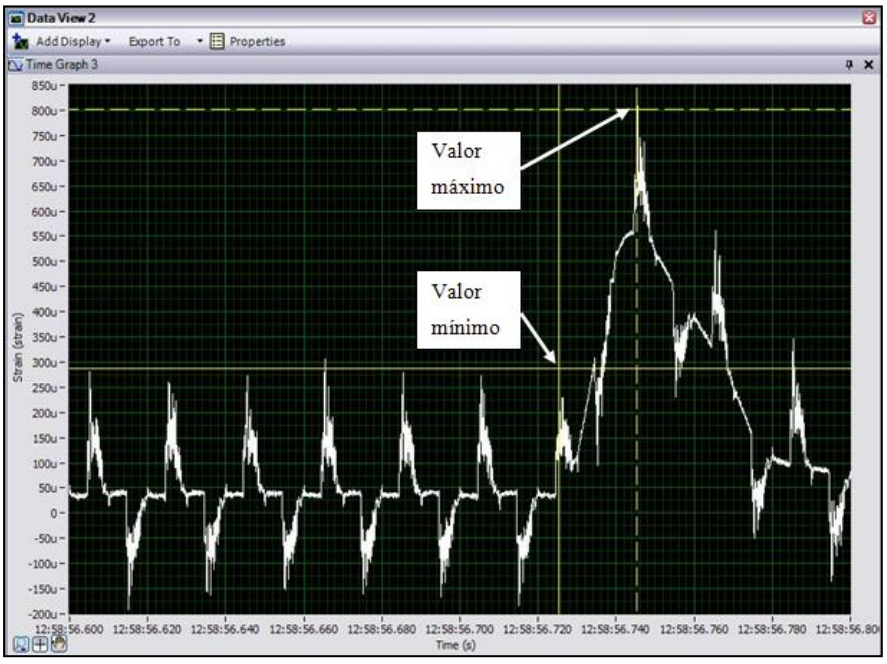

Figura 3-18: Determinación de deformación máxima y mínima debida a pulso de carga (Medición realizada con software Labview

De esta Figura se aprecia que el máximo valor obtenido durante la aplicación de la carga es 801,5 *microstrain*. Por otro lado, el valor sin carga es 287,8 *microstrain*, que corresponde a la deformación debida al peso del carro en que se encuentra instalado el deflectómetro de impacto. El valor considerado corresponde al peak dentro de la variación propia del instrumento. Luego, la deformación horizontal medida producto de la carga aplicada de 50 KN que entrega el programa es de 513,6 *microstrain*.

Los resultados obtenidos por deflectometría de impacto y por instrumentación son los siguientes:

Tabla III-3: Resultados de deflectometría de impacto e instrumentación

Punto	FWD			Instrumentación		
	Deformación (u Strain)			Deformación (u Strain)		
HPAST 1	1.189	1.142	1.163	*	*	*
Intermedio	1.147	1.151	1.175	0	0	0
HPAST 2	1.151	1.177	1.179	467,7	471,2	483,5

EL HPAST 1 sufrió deformaciones durante la colocación, por lo cual no fue posible obtener mediciones confiables. ES por esto que para el análisis se considerarán sólo los valores medidos con el HPAST 2. Por otro lado, las mediciones a cargas aplicadas en el punto medio entre ambos sensores (50 cm) indican que los strain gages no son capaces de medir deformación por cargas a esa distancia.

3.5. Análisis de Datos

La deformación medida con el Deflectómetro de impacto corresponde a la deformación vertical medida al momento de aplicar la carga. Por otro lado, la deformación medida con los strain gages corresponde a la deformación transversal.

De esta forma es posible calcular en coeficiente de Poisson (u=Deformación Horizontal/Deformación Vertical)

En la **Tabla III-4**. se presentan los cálculos obtenidos con el HPAST 2.

Tabla III-4: Cálculo de Coeficiente de Poisson de acuerdo a mediciones realizadas con FWD y con HPAST 2

Deformación (u)		Coeficiente Poisson
Vertical	Horizontal	
1.151	467,7	0,40
1.177	471,2	0,40
1.179	483,5	0,41

Este valor es razonable, dado que se encuentra en el rango del valor de Poisson considerado para mezclas en caliente a esa temperatura.

En las etapas anteriores de esta investigación se asumió que el coeficiente de Poisson es 0,35. Estos resultados indican que en efecto, los valores de deformación obtenidos mediante instrumentación son consistentes en relación a la deformación medida con el deflectómetro de impacto, para una misma carga. Sin embargo, se debe considerar que la deformación medida con los strain gages corresponde a la deformación horizontal, y la deformación medida con el deflectómetro de impacto corresponde a la deformación vertical.

CAPITULO IV: CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

- Se ha demostrado que el módulo de una mezcla asfáltica convencional aumenta en el tiempo, y luego de dos años tiende a un valor que se encuentra entre 8.000 MPa y 10.000 MPa. Sin embargo, el valor del módulo sigue siendo dependiente de la temperatura de ensayo.
- Es posible realizar mediciones en terreno, ya sea por deflectometría de impacto como a través de instrumentación, obteniendo resultados comparables entre si.
- Se ha demostrado que la medición de módulo en un testigo de pavimento entrega valores menores a la medición a una probeta fabricada en laboratorio. Además, existe una relación entre estos dos valores, ambos analizados en laboratorio con el mismo método de ensayo. Por esto, es recomendable considerar que el módulo de rigidez obtenido en laboratorio no corresponde al módulo que se obtendrá en el pavimento, por lo cual se debe realizar esta corrección para efectos de diseño.
- Se ha encontrado que el modulo de rigidez que se obtiene de las gráficas de Shell, corresponde al módulo de rigidez obtenido en laboratorio para probetas recién fabricadas. Sin embargo, el valor que entrega la gráfica de Shell es conservador.
- La diferencia entre el módulo de rigidez a 15°C y a 25°C, con este método de ensayo, Disminuye muy poco en el tiempo, siendo del orden de 3.700 MPa para los primeros dos años, y del orden de 2.700 MPa para un pavimento antiguo (20 años).
- Existen otros factores que también pueden influir en los resultados de ensayo, todos ellos considerados en el estudio, tales como: Pulsos de acondicionamiento,

rise time, deformación horizontal, dimensiones del espécimen, capacidad del actuador utilizado, forma del pulso, temperatura y factor del área de carga.

- Para probetas fabricadas en laboratorio, el nivel de compactación (50 golpes por cara v/s 75 golpes por cara) no influye en el valor de módulo que tendrá después de un año.

- Para mezclas no convencionales, como mezclas de alto módulo, su comportamiento en el tiempo parece ser igual que una mezcla convencional, pero de magnitud distinta.

- Los valores de deformación obtenidos por instrumentación son distintos en magnitud a los obtenidos por deflectometría. Esto debido a que la deflectometría considera deformación vertical, y la instrumentación mide deformación horizontal. Sin embargo, ambas deformaciones son consistentes, ya que entregan un coeficiente de Poisson aceptable. Esto es un factor que debe tenerse en cuenta al utilizar instrumentación para medir módulo, ya que la carga aplicada sobre el pavimento no corresponde a la carga axial que debe ser considerada para este cálculo.

- Se ha encontrado una relación entre el módulo de probetas de laboratorio y testigos de pavimento, que es $M_{testigo}=K*M_{laboratorio}$, en donde K parece no variar significativamente en el tiempo.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar el Método (EN 12697) para la determinación de Módulo de Rigidez en Laboratorio, ya que representa de mejor forma el módulo de Young.
- Se ha encontrado una relación entre el módulo de probetas de laboratorio y testigos de pavimento: $M_{testigo} = K * M_{laboratorio}$, en donde K, parece no variar significativamente en el tiempo. Es recomendable realizar más ensayos de laboratorio para confirmar el valor de K, y verificar si es aplicable en general a otras mezclas asfálticas, o si cada mezcla en particular tiene un coeficiente distinto.
- Se recomienda realizar el ensayo en las siguientes condiciones, de acuerdo a lo realizado en este estudio:

Item	Recomendación
Pulsos de acondicionamiento	5
Rise Time	124
Dimensiones del espécimen	probetas Marshall
Deformación horizontal	5 micrones
Capacidad del actuador utilizado	de 3 Toneladas Mínimo
Forma del pulso	Haversine
Temperatura de ensayo	15ºC
Factor del área de carga	0,6
Edad de la probeta o testigo al momento de efectuar el ensayo	Informar

Con respecto a especificación de módulo, y para efectos de diseño, se propone lo siguiente:

- Para mezclas convencionales, especificar un valor de módulo de Rigidez a 15°C, teniendo en consideración que este módulo aumentará en el tiempo, y al cabo de dos años alcanzará un valor entre 8.000 y 10.000 MPa. Luego, en la etapa de diseño de mezcla, incluir en los controles la determinación de módulo de Rigidez, bajo las mismas condiciones (Temperatura, frecuencia, etc). Este valor controlaría el desempeño de la mezcla a bajas temperaturas.
- Al especificar módulo, considerar la temperatura de la zona en que se construirá el pavimento.
- Se recomienda especificar un valor mínimo y máximo de módulo, ya que un módulo demasiado alto podría implicar que la mezcla se torne frágil.
- Por la razón anterior, se recomienda complementar la especificación de módulo con una especificación por vida a la fatiga.
- Para mezclas no convencionales, como mezclas de alto módulo, se recomienda realizar ensayos de laboratorio, ya que su comportamiento en el tiempo parece ser igual que una mezcla convencional, pero de magnitud distinta.

4.3. Futuras Líneas de Investigación

Dentro de las futuras líneas de investigación se encuentran:

- Cuando se disponga de un equipo que permita medir el módulo complejo en mezclas asfálticas, se recomienda realizar un análisis de la evolución del módulo complejo en el tiempo.
- Evaluar la correlación entre los valores de módulo de Rigidez para testigos y para probetas moldeadas.
- Desarrollo de metodología de diseño estructural, diseño de mezcla y control de obra (por instrumentación o a través de testigos) considerando módulo de rigidez.
- Evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas fuera del rango elástico.

BIBLIOGRAFIA

Gomez-Achecar, M., and Thompson, M.R. (1984). Mechanistic Design Concepts for Full-Depth Asphalt Concrete Pavements. *Civil Engineering Series No. 41, Illinois Cooperative Highway and Transportation Series No. 207, University of Illinois at Urbana-Champaign.*

Thompson, M. R. (1996). Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design: An Overview. *Transportation Research Record No. 1539, Transportation Research Board, Washington, D.C.*

Thompson, M. R., and Carpenter, S. H. (2004). Design Principles for Long Lasting HMA Pavements. *International Society for Asphalt Pavements, International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Auburn, AL.*

Shell International Petroleum Company Ltd., London, (1978). Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. *Shell Pavement Design Manual, pp 2-5*

Ullidz,P. (1987). Pavement Analysis. *Elsevier Science Publishers B.V.*

Loulizi, A., Al-Qadi, I., Lahouar, S., and Freeman, E. (2002). Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavements. *81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper No. 02-2376, Washington D.C.*

Zuñiga, R. Wahr,C (2006) Contrastación en la medición de módulo resiliente en mezclas asfálticas con tres métodos de ensaye *Congreso Internacional Provial 2006, Antofagasta Chile. pp 265-278*

Meléndez, A (2008) Desarrollo de nuevo método de diseño de mezclas asfálticas. *Congreso Internacional Provial 2008, Puerto Varas Chile, Octubre, 2008. pp 153-161*

NCHRP Project 1-37A, (2003). 2002 Design Guide for New & Rehabilitated Pavements (Final Document). *Appendix CC-3: "Updated Traffic Frequency Calculation for Asphalt Layers, December 2003. <http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>.*

Ministerio de Obras Públicas (2008) Manual de Carreteras. *Volumen°8,*

Ministerio de Obras Publicas (2003) Manual de Carreteras *Volumen n°5*

Papazian, H. S. (1962). The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphalt concrete. *Proceedings of International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, Michigan,* pp. 453-464.

Clyne, T.R., Li, X., Marastenau, M.O., and Skok, E.L. (2003). Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures *Final Report MN/RC – 2003-09. University of Minnesota, Minneapolis, MN.*

Nunn, M.E., and Smith,T.M. (1997), Improvements to the Indirect Tensile Stiffness Modulus, *Proceedings of The 2° European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials, Leeds*, pp. 411-426.

http://servicio.cid.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a5n2/5-2-2.pdf

http://www.sensorland.com/HowPage002.html

ANEXOS

ANEXO 1: DETERMINACION DEL MODULO RESILIENTE MEDIANTE NORMA ASTM

Este procedimiento está basado bajo la Normativa Americana D4123 – 82 (Reaprobada 1995), "Test de tensión indirecta para módulo resiliente de mezclas bituminosas".

El test de tensión indirecta es un método no destructivo que permite determinar el modulo resiliente de los materiales asfálticos de pavimentos para una carga vertical seleccionada. El ensaye se realiza normalmente sobre probetas de diámetro de 100 ó 150 mm con un espesor de probetas que van entre los 50 a 70 mm principalmente.

El equipamiento necesario para la realización de este test esta contenido dentro de los elementos que el equipo NAT presenta.

Durante el ensayo, la probeta cilíndrica es sometida a cargas de compresión de forma ondulada (*Haversine*), la carga se aplica verticalmente en un plano diametral de la probeta cilíndrica.

Mediante el ensayo se obtienen valores para la deformación horizontal, y asumiendo un valor para el coeficiente de *Poisson,* es posible encontrar un valor del módulo resiliente.

La interpretación de los datos de deformaciones horizontales permite obtener dos valores de módulos. El módulo resiliente instantáneo, el cual se calcula usando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la descarga de un ciclo. El módulo resiliente total es calculado usando la deformación recuperable total, la cual incluye la deformación recuperada instantáneamente y la deformación recuperada durante el periodo de descarga y el resto del periodo total (tiempo de reposo)

El rango de carga puede variar desde un 10 a un 50 % del esfuerzo de tensión que puede ser determinado mediante algún método destructivo.

La duración del pulso de carga durante el ciclo puede variar de 0,1 a 0,4 segundos.

Cálculo de módulo de resiliente

Los módulos resilientes instantáneo y total se obtienen de la siguiente expresión:

$$M_{RI} = \frac{P(\nu + 0{,}27)}{D_I * h} \qquad \text{y} \qquad M_{RT} = \frac{P(\nu + 0{,}27)}{D_T * h} \qquad \text{(A.1.1)}$$

donde:

P : amplitud del pulso de carga, expresada en N

h : espesor de la probeta, expresada en mm

ν : razón ó coeficiente de Poisson, el cual es asumido para la temperatura de medición de 25ºC de $\nu = 0{,}35$

DI : deformación resiliente instantánea, expresada en mm

DT : deformación resiliente total, expresada en mm

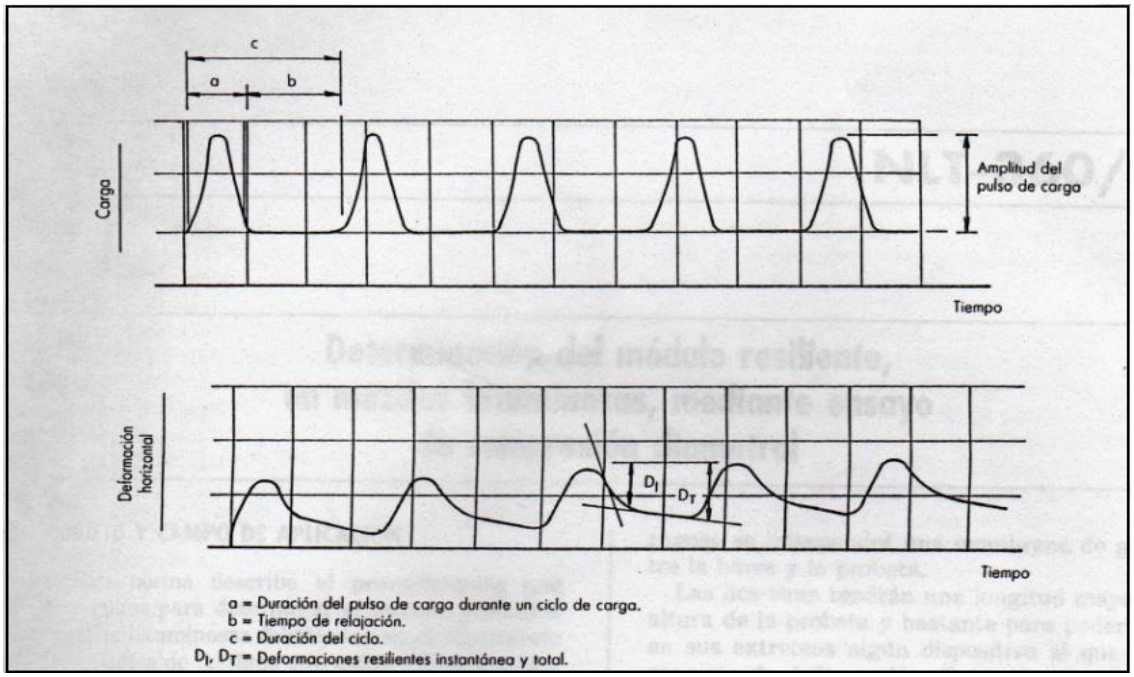

Figura A-1-1: Forma de pulsos de carga y deformación esperados (Fuente: ASTM D4123)

Los datos de entrada para el programa N.A.T. se pueden apreciar en la siguiente figura:

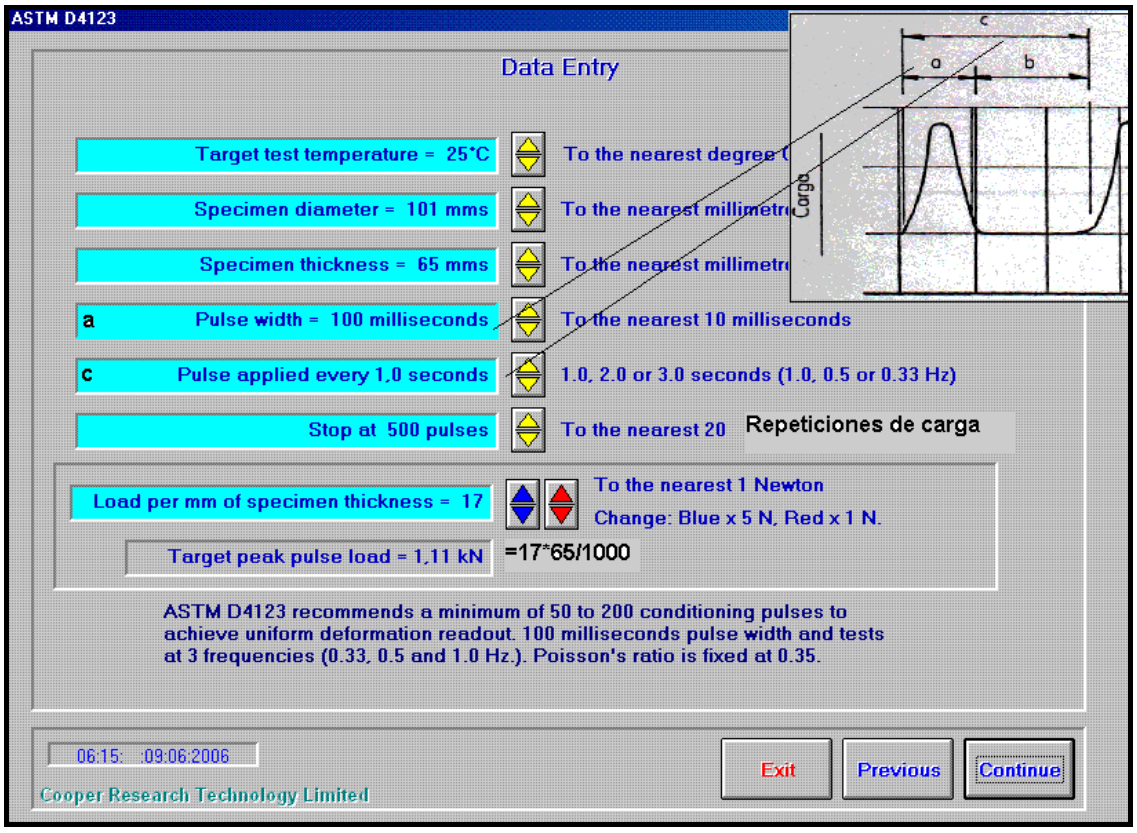

Figura A-1-2: Datos de entrada para medición módulo Resiliente

Luego de introducir los datos se calibran los transductores para iniciar los pulsos o repeticiones de carga. Dependiendo del tipo de frecuencia y de la temperatura del ensayo se recomienda un mínimo de 50 a 200 repeticiones de carga.

ANEXO 2: DETERMINACION DEL MODULO DE RESILIENTE MEDIANTE NORMA AASHTO

Este procedimiento está basado bajo la normativa americana AASHTO TP31, "Test de tensión indirecta para módulo resiliente de mezclas bituminosas"

Este test es similar al procedimiento ASTM 4123. La diferencia radica principalmente en la utilización de transductores LVDT verticales que permiten medir deformaciones verticales de la probeta al ser sometida a pulsos de cargas, pudiendo entonces obtener en forma directa el coeficiente de Poisson, en conjunto con las deformaciones horizontales.

Los módulos resilientes total e instantáneo se calculan de la siguiente manera:

$$M_{RI} = \frac{P(\upsilon_{RI} + 0{,}27)}{\Delta H_I * h} \qquad M_{RT} = \frac{P(\upsilon_{RT} + 0{,}27)}{\Delta H_T * h} \tag{A.2.1}$$

$$\upsilon_{RI} = 3{,}59\frac{\Delta H_I}{\Delta V_I} - 0{,}27 \qquad \upsilon_{RT} = 3{,}59\frac{\Delta H_T}{\Delta V_T} - 0{,}27 \tag{A.2.2}$$

donde:

P : carga repetida máxima

υ_{RI} : coeficiente de Poisson instantáneo

υ_{RT} : coeficiente de Poisson total

ΔH_I : deformación horizontal recuperable instantánea, en mm

ΔH_T : deformación horizontal recuperable, en mm

h : espesor de la probeta, mm

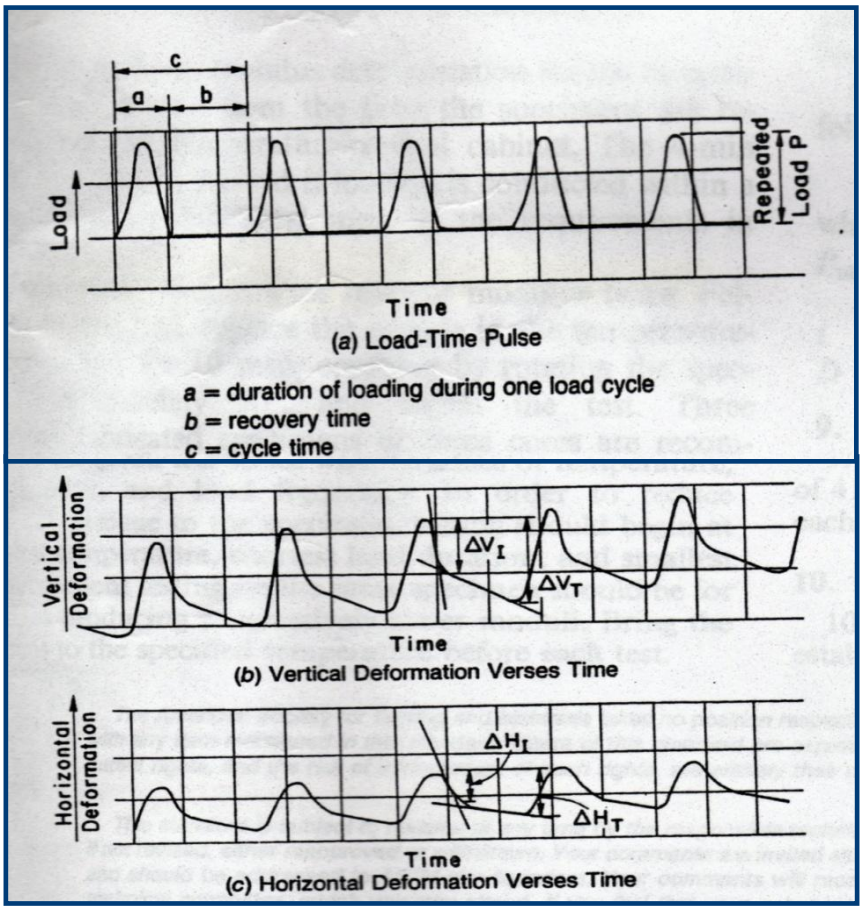

Figura A-2-1: Forma del pulso de carga y de la deformación instantánea y total (Fuente: AASHTO TP 31)

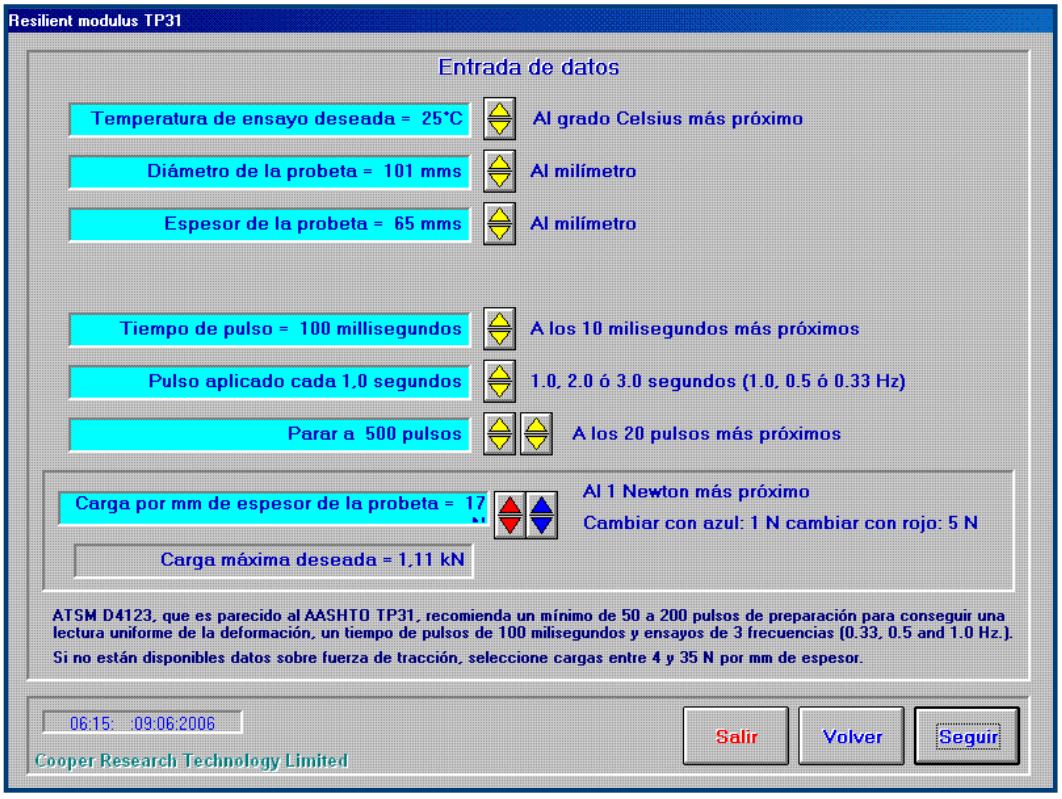

Figura A-2-2: Datos de entrada para Ensayo de Módulo Resiliente AASHTO TP31, con equipo Nottingham Asphalt Tester (N.A.T)

ANEXO 3: STRAIN GAGES

Los strain gages han sido usados por muchos años y es el elemento sensor fundamental para muchos tipos de mediciones, incluyendo entre otros: de presión, celdas de carga, sensores de torque, sensores de posición, etc.

La mayoría de los strain gages están disponibles en un amplio rango de formas y tamaños para adecuarse a una variedad de aplicaciones. Básicamente consisten en una resistencia, la cual está montada en un material de respaldo. Los Strain Gages se basan en el principio de que como la resistencia está sujeta a tensión, ésta cambiará en una forma definida, conforme a la deformación.

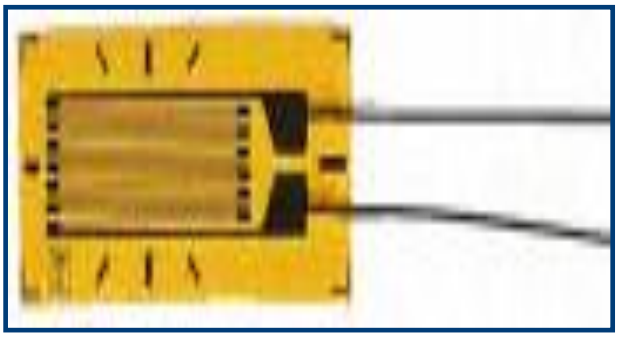

Figura A-3-1: Típico strain gage, resistencia montada sobre un material de respaldo

El strain gage se conecta en un circuito Puente de *Wheatstone* con una combinación de cuatro gauges activos (*Full Bridge*), dos gauges (*half bridge*), o, menos comúnmente, un solo gauge (*quarter bridge*). En el circuito medio y cuarto, el puente se completa con resistores de precisión.

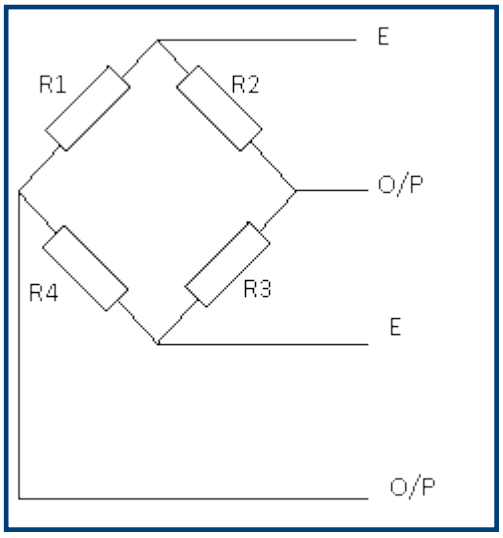

Figura A-3-2: Diagrama que representa un puente de Wheatstone, en donde cada R representa una resistencia eléctrica

En situación de equilibrio, se cumple que

$$R1 \times R3 = R2 \times R4. \qquad (A.3.1)$$

El puente *Wheatstone* completo se excita con un suministro estable de corriente continua (DC). Se puede tarar (Fijar el cero) en el punto nulo de medición. A medida que la tensión es aplicada al *strain gage* pegado, se producen cambios resistivos, y desbalance en el puente *Wheatstone*. Esto resulta en una salida de señal relacionada con el valor de la tensión.

La mayoría de los fabricantes de *strain gage* ofrecen rangos extensivos de patrones diferidos para adecuar una amplia variedad de aplicaciones en investigación y proyectos industriales. También suministran los accesorios necesarios incluyendo materiales de preparación, adhesivos, placa de conexión, cable, etc. La colocación de los *strain gages*

requiere de habilidad y cuidado, ya que de esto depende la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Principio de funcionamiento

Si un trozo de metal conductivo se estira, se volverá más delgado y largo. En ese caso, ambos cambios resultan en un incremento de la resistencia eléctrica de un extremo al otro del trozo de metal. Por otro lado, si este trozo de metal conductivo se pone bajo una fuerza compresiva (sin doblarse), se ensanchará y acortará. Si esas tensiones se mantienen en el rango elástico del trozo de metal (De tal forma que no tenga deformación permanente), el trozo metálico puede usarse como un elemento de medición de la fuerza física, la magnitud de la fuerza aplicada inferida de la medición de su resistencia. A este dispositivo se le llama *Strain Gage,* o *Strain Gauge.*

Los *strain gauges* se usan frecuentemente en investigaciones de ingeniería mecánica y desarrollo para medir la tensión generada por la maquinaria. Generalmente, los *strain gauges* se adhieren a partes estructurales, enlaces, u otro componente crítico de una estructura para medir la deformación. La mayoría de los *strain gauges* son mas pequeños que una estampilla, tienen la siguiente apariencia:

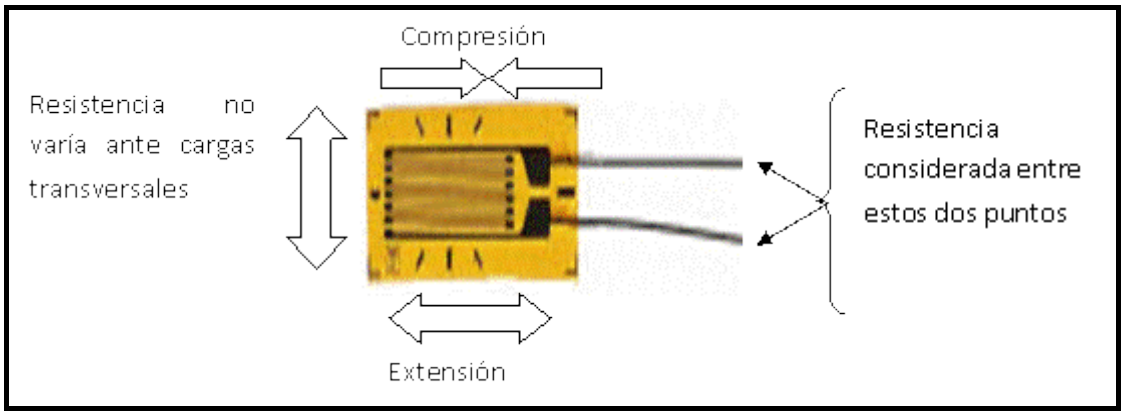

Figura A-3-3: Principio de funcionamiento de un strain gage típico

Los conductores de un *strain gauge* son muy delgados y están hechos de cable redondo, alrededor de 0,0025 cm de diámetro. Alternativamente, los conductores de strain gauge pueden ser tiras delgadas de placas metálicas colocadas en sustratos de materiales no conductivos denominados "*Carrier*", tal como se muestra en la figura anterior. El nombre *"Bonded Gauge"* (medidor pegado) se le da a los *strain gauges* que están pegados a una estructura más grande que está bajo tensión, denominada generalmente como el **espécimen de ensayo**. La tarea de pegar el *strain gauge* al espécimen es extremadamente delicada y compleja, absolutamente esencial para obtener mediciones de deformación estables y exactas. También es posible usar un cable medidor estirado entre dos puntos mecánicos para medir tensión, pero esta técnica tiene sus limitaciones.

Las resistencias típicas de los *strain gauges* están en el rango entre 30 Ohm y 3 kOhm (sin deformación). Esta resistencia puede cambiar sólo una fracción de porcentaje por el rango de fuerza total del medidor, dadas las limitaciones impuestas por los límites elásticos del material de medición, y el espécimen de ensayo. Si se aplicasen fuerzas demasiado grandes, de tal forma que se induzcan deformaciones permanentes en el espécimen de ensayo y/o los mismos conductores de medición, se arruinaría el instrumento de medición. De esta forma, para utilizar el *strain gauge* como un instrumento práctico, se deben medir cambios extremadamente pequeños en la resistencia, con mucha exactitud. Este requerimiento de precisión lleva a utilizar un circuito de medición en puente (*Bridge measurement circuit*). A diferencia del *Wheatstone bridge*, que usa un detector de balance nulo, y un operador humano para mantener el estado de balance, un circuito de puente de *strain gauge* indica la deformación medida por el grado de desbalance (desequilibrio), y

utiliza un voltímetro de precisión en el centro del puente para proveer una medición exacta de ese desequilibrio.

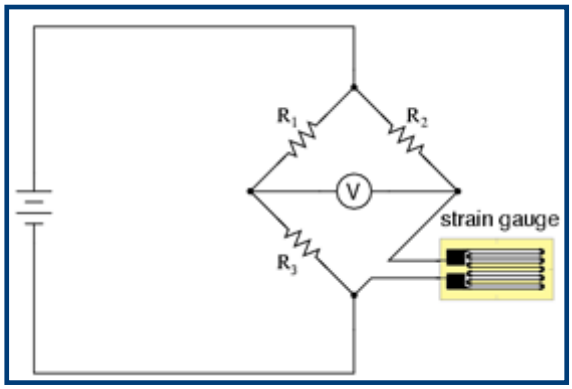

Figura A-3-4: Circuito de *Strain Gage* de un cuarto de puente (Fuente: www.Sensorland.com)

Generalmente, el brazo reostático del puente (R2 en la figura) debe tener una resistencia igual al de la resistencia del *strain gauge* sin aplicar carga. Los dos brazos de proporciones del puente (R1 y R3) deben tener resistencias iguales. Así, sin fuerza aplicada en el *strain gauge*, el puente estará balanceado simétricamente y el voltímetro indicará cero volts, representando cero fuerza aplicada en el *strain gauge*. A medida que el *strain gauge* sea comprimido o tensado, su resistencia decrecerá o aumentará, respectivamente, desbalanceando el puente y produciendo una variación en lo que indique el voltímetro. Este dispositivo, con un solo elemento del puente cambiando resistencia en respuesta a la variable medida (Fuerza mecánica) se conoce como circuito de un cuarto de puente (*quarter –bridge circuit*).

Si la distancia entre el strain gauge y las otras tres resistencias en el circuito de puente es considerable, la resistencia del cable tiene un impacto significativo en la operación del circuito. Para ilustrar los efectos de la resistencia del cable, se presenta el mismo diagrama

esquemático, pero incorporando dos resistores simbólicos en serie con el strain gauge para representar los cables:

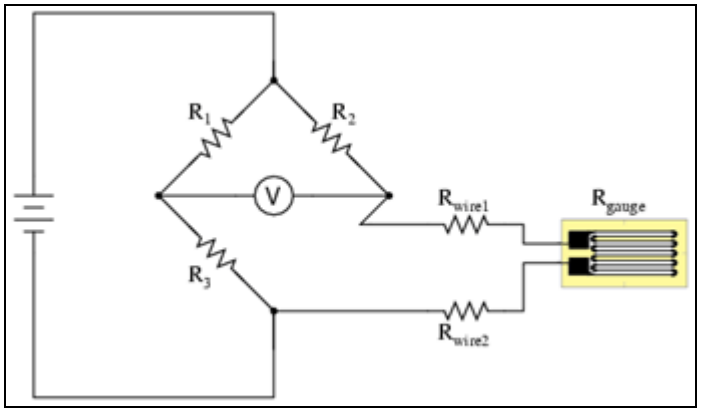

Figura A-3-5: Efecto de la resistencia del cable (Fuente: www.Sensorland.com)

La resistencia del Strain gauge (Rgauge) no es la única resistencia que se está midiendo: las resistencias de los cables Rwire1 y Rwire2, que están en serie con Rgauge, también contribuyen a la resistencia de la mitad de abajo del brazo reóstatico del puente, y por lo tanto contribuye a lo que indica el voltímetro. Esto podría ser interpretado en la medición, erróneamente, como una deformación física del medidor (Gauge). Mientras más largos son los cables, mayor es el efecto que tendrán en la medición.

Mientras este efecto no se elimine completamente en esta configuración, se puede minimizar con la incorporación de un tercer cable, que conecte el lado derecho del voltímetro directamente con el cable superior del strain gauge:

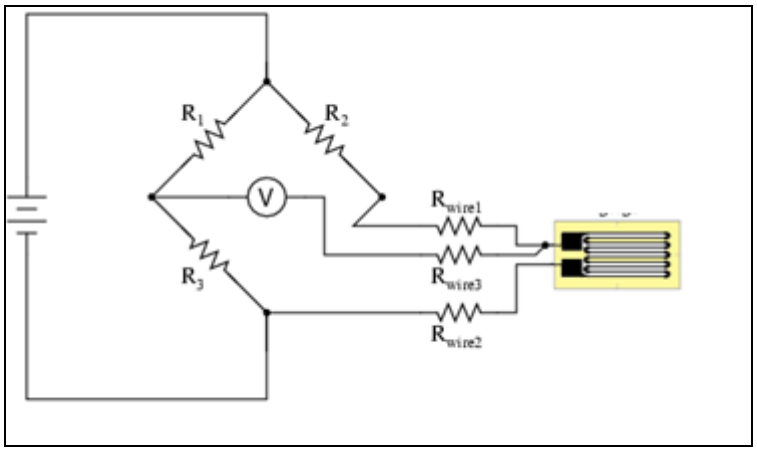

Figura A-3-6: Incorporación de tercer cable (Fuente: www.Sensorland.com)

Como el tercer cable prácticamente no lleva corriente (dada la resistencia interna extremadamente alta del voltímetro), su resistencia no bajará sustancialmente el voltaje. Nótese como la resistencia del cable superior (Rwire1) ha sido bypaseada ahora que el voltímetro se conecta directamente con el terminal del strain gage, dejando sólo la resistencia del cable de abajo (Rwire2) para producir cualquier desviación en la resistencia en serie con el medidor (Gauge). Esta solución no es la óptima, pero mejora sustancialmente las mediciones en comparación al circuito anterior.

Por otro lado, hay una forma de reducir el error de la resistencia del cable mejor que con el método descrito, y además ayudar a mitigar otros tipos de error de medición debido a la temperatura. Una característica de los Strain Gages es que la resistencia cambia con los cambios de temperatura. Esta es una propiedad común para todos los conductores, algunos más que otros. Así, el circuito de cuarto de puente (Ya sea con dos o tres cables conectando el gauge al puente) trabaja como un termómetro tan bien como lo hace como indicador de deformación. Si sólo se desea medir deformación, las mediciones no son óptimas. Sin embargo, se puede resolver este problema usando un strain gage "Dummy"

en lugar de R2, para que ambos elementos del brazo reostático cambien resistencia en la misma proporción cuando cambie la temperatura, anulando así el efecto del cambio de temperatura.

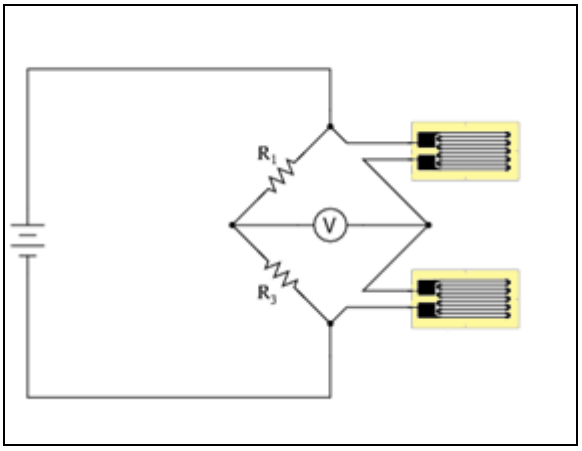

Figura A-3-7: Circuito de cuarto de puente con compensación de temperatura (Fuente: www.Sensorland.com)

Los resistores R1 y R3 son de igual valor de resistencia, y los strain gages son idénticos entre sí. Sin fuerza aplicada, el puente debe estar en una condición de perfecto balance y el voltímetro debe registrar cero volts. Ambas gauges deben estar pegadas al mismo espécimen de ensayo para estar a la misma temperatura, pero solo uno está colocado en posición y orientación para estar expuesto a deformación física (el gauge activo). El otro gauge está aislado de todas las tensiones mecánicas, y actúa sólo como un dispositivo de compensación de temperatura (el gage "Dummy"). Si la temperatura cambia, las resistencias de ambos gauges cambiarán en el mismo porcentaje, y el estado de balance del puente permanecerá inalterado. Sólo una resistencia diferencial (Diferencia de resistencia entre los dos strain gages) producida por una fuerza física en el espécimen de ensayo puede alterar el balance del puente.

La resistencia del cable no afecta la exactitud tanto como antes, debido a que los cables que conectan ambos strain gages al puente tienen aproximadamente el mismo largo. Por lo tanto, la sección de arriba y de abajo del brazo reostático del puente contiene aproximadamente la misma cantidad de resistencia perdida, y su efecto tiende a anularse:

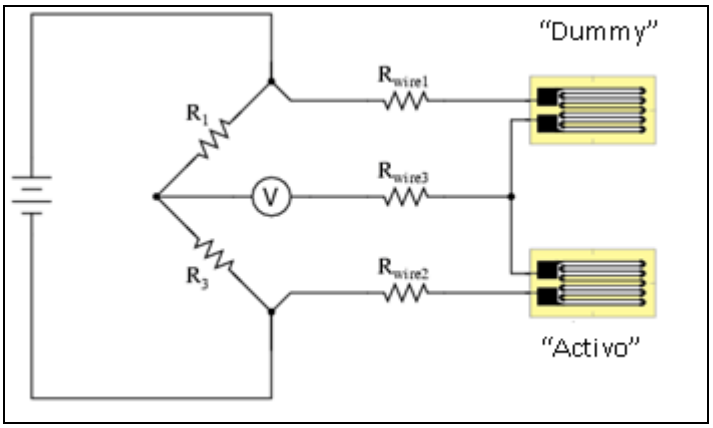

Figura A-3-8: Gauge activo y "Dummy" (Fuente: www.Sensorland.com)

A pesar de que con esta configuración se tienen dos strain gages en el circuito de puente, sólo uno es sensible a la deformación mecánica, y así este arreglo sigue siendo considerado como un cuarto de puente. Sin embargo, si se tomara el strain gage superior y se colocara para que sea expuesto a la fuerza opuesta del gage inferior (Por ejemplo cuando el gage superior se comprime, el inferior se estira, y viceversa), se tendría ambos gages respondiendo a la deformación, y el puente sería más sensible a la fuerza aplicada. Esta utilización se conoce como medio puente (Half Bridge). Dado que ambos strain gages incrementarán o disminuirán sus resistencias en la misma proporción en respuesta a cambios en la temperatura, el efecto de los cambios de temperatura se mantienen anulados y el circuito sufrirá un error de medición inducido por temperatura mínimo.

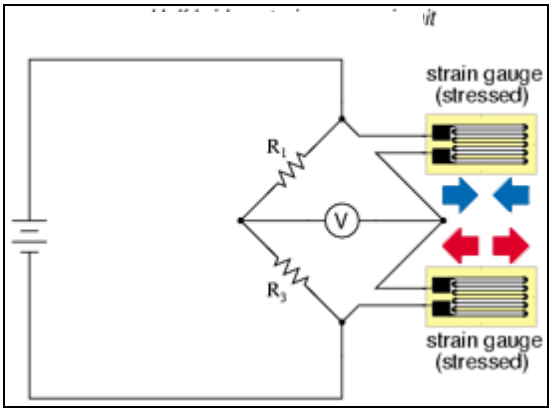

Figura A-3-9: Circuito de Medio Puente (Fuente: www.Sensorland.com)

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación de circuito de medio puente:

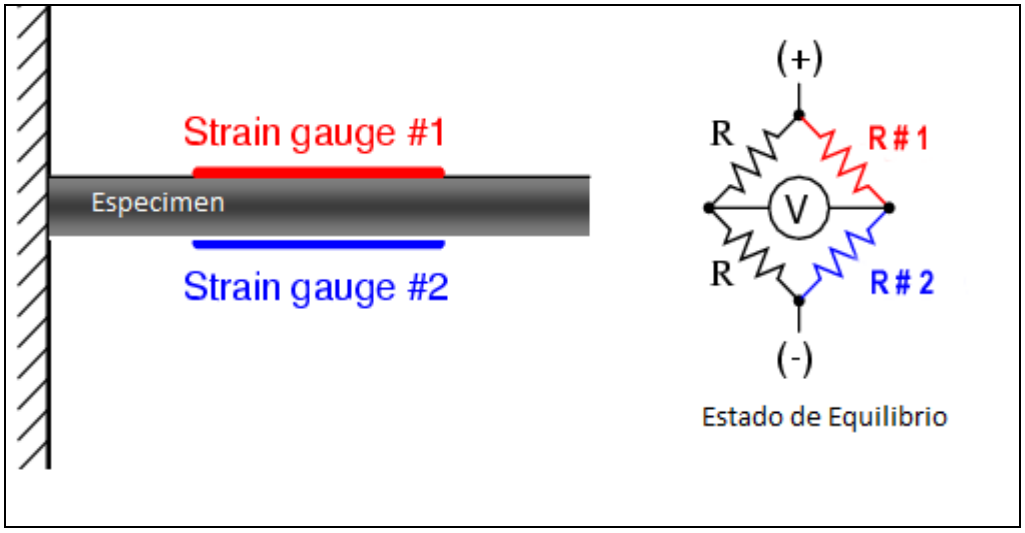

Figura A-3-10: Representación de puente balanceado

Sin fuerza aplicada al espécimen, ambos strain gages tienen igual resistencia y el circuito de puente está balanceado. Sin embargo, cuando en el extremo libre del espécimen se aplica una fuerza vertical hacia abajo, éste se doblará hacia abajo, alargando el strain gauge nº1 y comprimiendo el strain gaugenº2 al mismo tiempo:

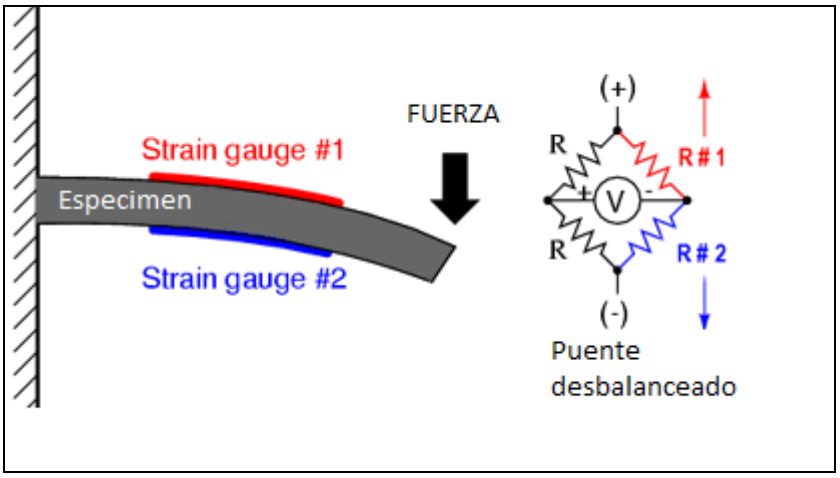

Figura A-3-11: Representación de puente desbalanceado producto de carga vertical

En aplicaciones en donde tales pares complementarios de strain gages puedan ser pegados al espécimen de ensayo, puede ser ventajoso hacer los cuatro elementos del puente "activos" para una mayor sensibilidad. A esto se le llama circuito de puente completo (*Full-bridge circuit*):

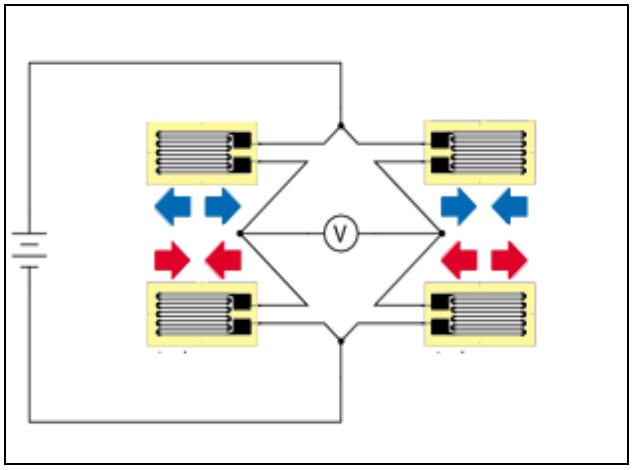

Figura A-3-12: Diagrama que representa circuito de puente completo (Fuente: www.Sensorland.com)

Tanto la configuración del medio puente como el puente completo otorgan una mayor sensibilidad que el circuito de cuarto de puente, pero a menudo no es posible unir

complementariamente pares de strain gages al espécimen de ensayo. Así, frecuentemente se utiliza el circuito de un cuarto de puente en los sistemas de medición de deformación.

La mejor configuración a usar es la de puente completo, cuando es posible. Esto es no solo porque es más sensitiva que las otras, sino porque es lineal, mientras que las otras no. Los circuitos de cuarto de puente y medio puente proveen una señal de salida (desbalance) que es sólo aproximadamente proporcional a la fuerza aplicada al strain gage. La linealidad o proporcionalidad de esos circuitos de puente es mejor cuando la magnitud de cambio de resistencia debido a la fuerza aplicada es muy pequeña comparada con la resistencia nominal de el o los gauges. Sin embargo, con un puente completo el voltaje de salida es directamente proporcional a la fuerza aplicada, sin aproximación (previendo que el cambio en la resistencia causada por la fuerza aplicada es igual para los cuatro strain gages).

A diferencia de los Wheatstone y los puentes de Kelvin, los cuales proveen mediciones en condición de perfecto balance y por lo tanto función independiente de la fuente de voltaje, la magnitud de la fuente (o excitación) de voltaje interesa en un puente desbalanceado como este. De esta forma, los puentes de strain gages están considerados en milivolts de desbalance producido por volt de excitación, por unidad medida de fuerza. Un ejemplo típico para un strain gage del tipo usado para medir fuerza en ambientes industriales es 15mV/V a 1000 pounds. Esto quiere decir que a exactamente 1000 pounds de fuerza aplicada (ya sea de tensión o compresión), el puente se desbalanceará en 15 milivolts por cada volt de voltaje de excitación. De nuevo, tal figura es precisa si el circuito de puente está totalmente activo (cuatro strain gages activos, uno en cada brazo del puente), pero sólo aproximado para circuitos de medio puente o un cuarto de puente.

Los strain gages se pueden comprar como unidades completas, con elementos de strain gages y resistores de puente en una carcaza, sellada y encapsulada para protección de los elementos, y equipada con puntos de sujeción mecánicos para pegar a una máquina o estructura. A este paquete se le llama celda de carga.

Principio de cálculo de deformación

Los Strain Gages son capaces de medir la deformación de la estructura a la que se encuentren adosados. Esto es debido a que, como se mencionó anteriormente, al aplicar una carga que produzca una deformación, el strain gage presentará una variación de voltaje, debido al cambio de resistencia del strain gage. Al tener la deformación y el cambio de voltaje una relación lineal, se puede encontrar un factor de Strain tal que:

$$F = \frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \tag{A.3.2}$$

donde:

F : factor de Strain Gage

ΔV: variación del voltaje debido a la carga aplicada

Vo : voltaje Inicial

ΔL: variación de la Deformación debido a la carga aplicada

Lo : dimensión Inicial

Ahora, la deformación unitaria, expresada en *microstrain* es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{A.3.3}$$

Luego, la deformación del Strain gage producto de la carga aplicada se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{F} \tag{A.3.4}$$

ANEXO 4: TIPOS DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS

La instrumentación de pavimentos se ha convertido en una importante herramienta para monitorear in situ el desempeño de los pavimentos y medir cuantitativamente la respuesta de los pavimentos ante las cargas y el ambiente.

Los parámetros que se miden en terreno son: Tensiones, deformaciones, deflexiones, humedad y temperatura. La medición en terreno de estos parámetros permite el desarrollo de modelos de desempeño más exactos, y la calibración de diseño mecanicistas.

Descripción de la instrumentación:

a.- Strain Gages para Asfalto

Existen varios tipos de strain gages disponibles en el mercado. Generalmente estos strain gages para pavimentos asfálticos van colocados en la parte inferior de un núcleo en la capa asfáltica. La principal preocupación es si existe una unión efectiva entre el núcleo con el instrumento y el pavimento que la rodea, y que el strain gage no se dañe durante la colocación.

Otro instrumento utilizado son bobinas inductivas (Inductive strain coils), también conocidas como Bison coils, las cuales producen una salida electromagnética proporcional a la distancia entre dos rollo o bobinas.

Los strain gages que actualmente son más utilizados son los de tipo “H”. Estos sensores consisten en una resistencia eléctrica embebida en una cinta de fibra de vidrio reforzada con un epóxico, y rodeada por varias capas protectoras. Los principales fabricantes de este tipo de medidores son Dynatest, CTL Group, Tokyo Sokki, y Kyowa.

Estos Strain gages miden la respuesta a los esfuerzos de carga del asfalto frente a cargas dinámicas. Este tipo de strain gage corresponde a los HPAST utilizados en este estudio.

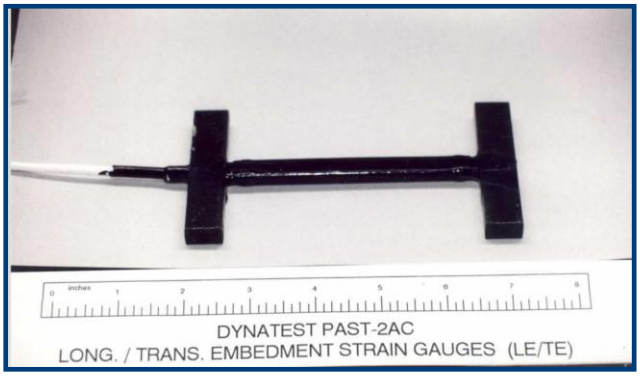

Figura A-4-1: Strain gage utilizado en el studio: Embedment Strain Gage (Fuente: Mn Road Test)

Estos sensores se ubican en el fondo de de la capa superficial de asfalto, por la huella del neumático.

b.- Strain Gage para granulares (*Aggregate Strain Gage*)

Las deformaciones en la interface de la Base/subbase o en la interface Subbase/subrasante raramente se han medido en tramos de prueba. El caso más conocido es el de Virginia Smart Road, donde se seleccionó el Geokon, modelo 3900.

c.- Strain Gages para suelos

Las deformaciones horizontales de los suelos se pueden medir utilizando el Carlson J-1 y el Geokon-VCE-4200 *vibrating wire strain gages*, entre otros. A pesar de que los *vibrating wire strain gage* se utilizan principalmente para evaluar los efectos de alabeo en losas de hormigón causadas por los efectos de temperatura y humedad, pueden ser utilizadas exitosamente en suelos para medir deformaciones estáticas.

Ese tipo de *strain gages* tiene una excelente durabilidad.

La ventaja de los *vibrating wire strain gage* sobre los convencionales de resistencia eléctrica (o semiconductores) radica principalmente en el uso de frecuencia, más que voltaje, como señal de salida del *strain gage.*

d.- Strain Gauge Biaxial

Mide la respuesta a los esfuerzos de cargas dinámicas. Este sensor consiste en cuatro indicadores de presión de resistencias eléctricas embebidas en un *mastic* asfáltico. Dos *strain gauges* se orientan longitudinalmente y dos transversalmente. Se colocan en el fondo de la capa asfáltica (En la superficie de la base)

Figura A-4-2: Strain Gage Biaxial (Fuente: Mn Road Test)

e.- Strain gage para Hormigón (*Concrete embedment strain gauge*)

Miden la respuesta de los esfuerzos del pavimento de Hormigón debidos a cargas dinámicas. Está embebido en una tira de fibra de vidrio reforzada con un epóxico, con un anclaje de acero transversal a cada extremo de la cinta que le da una forma de "H".

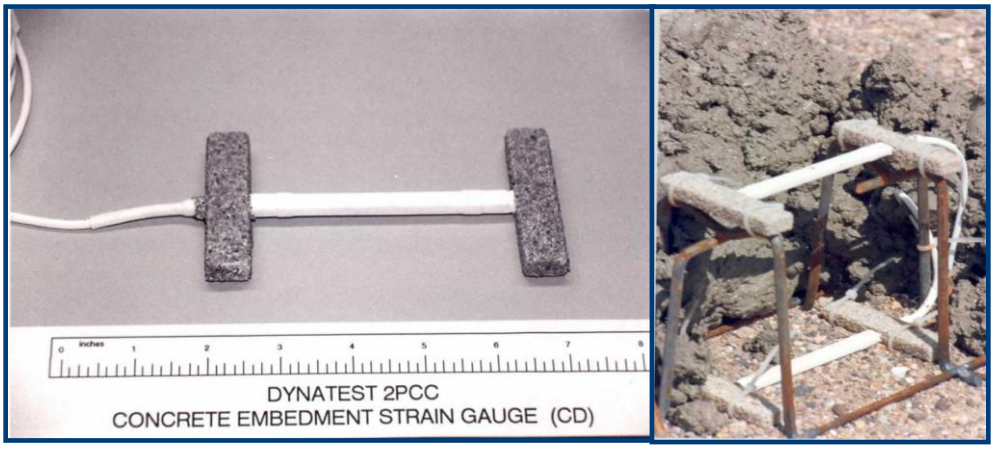

Figura A-4-3: Strain gage para hormigón (Fuente: Mn Road Test)

Figura A-4-4: Colocación de strain gage para hormigón (Fuente: Mn Road Test)

Estos sensores están embebidos e la capa de hormigón en la superficie y el fondo de la losa en varios puntos.

Otro tipo de Strain gage para Hormigón es un strain gauge sellado herméticamente entre dos platinas de resina delgadas. Se puede utilizar para medir tensiones dinámicas bajo cargas reales, y cargas calibradas.

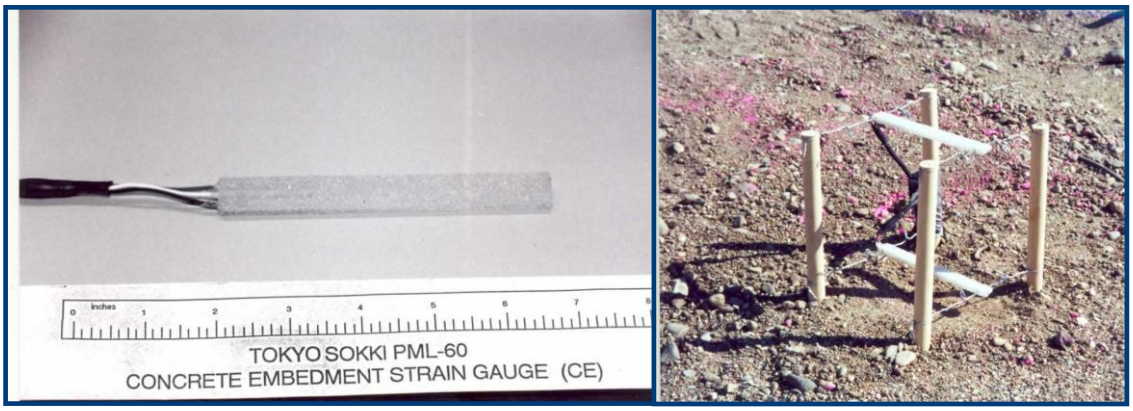

Figura A-4-5: Strain gage utilizado en hormigón (Fuente: Mn Road Test)

Para los Hormigones, también existen strain gages de acero, para medir la tensión aplicada a las barras de traspaso de cargas en las juntas transversales del pavimento de hormigón, debidas a las cargas dinámicas de los vehículos. Se montan en el tope, en el fondo, y a ambos lados de la barra. Cuando se dobla la barra, mide la tensión.

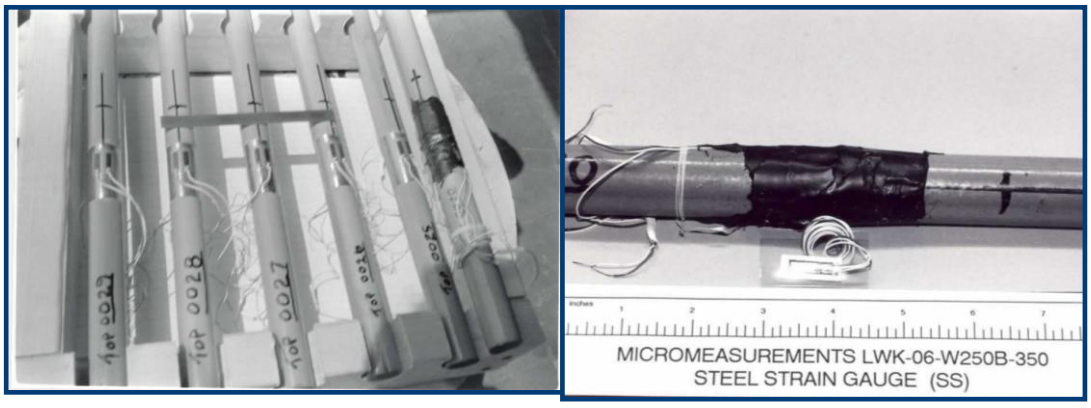

Figura A-4-6: Strain gage para barras de traspaso de carga (Fuente: Mn Road Test)

Otra aplicación de los strain gages en pavimentos de Hormigón es la medición de los movimientos horizontales de las losas en las juntas aserradas. Cada extremo de la cinta con

forma de “U” se conecta en cada lado de la junta, permitiendo medir el espacio entre las dos losas a medida que se mueven.

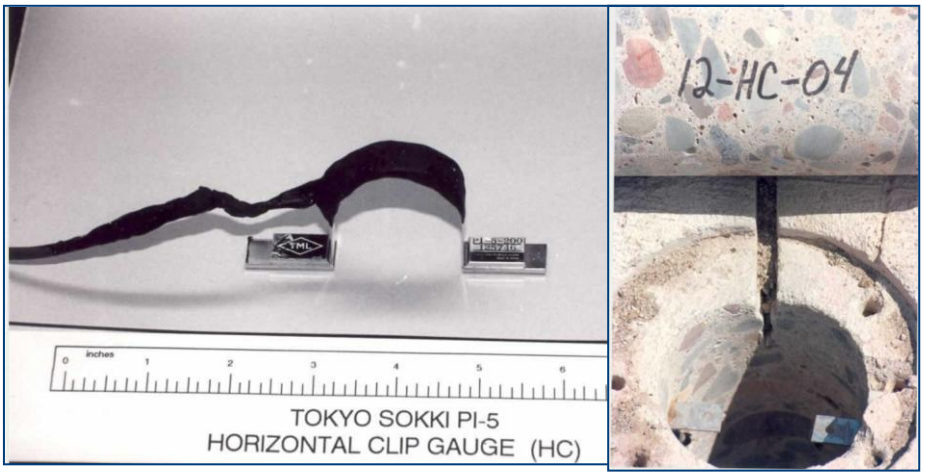

Figura A-4-7: Strain Gauge para medición en juntas de Hormigón (Fuente: Mn Road Test)

f.- *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT)

Son dispositivos electro mecánicos que produce una salida eléctrica proporcional al desplazamiento del vástago. Consiste en un rollo primario y dos rollos secundarios espaciados en forma cilíndrica. Un vástago ferromagnético con movimiento libre en el interior del rollo altera el acoplamiento de las ondas del transformador. Cuando se energiza el rollo primario, se inducen voltajes en los rollos secundarios. La salida neta del transductor es la suma algebraica de las magnitudes de esos dos voltajes, los que corresponden al cambio en la posición del vástago (Su desplazamiento).

Figura A-4-8: Medición con Linear Variable Differential Transducer (LVDT) (Fuente: Mn Road Test)

g.- Strain Gauge Dinámico

Mide la respuesta de esfuerzos de Pavimento de Hormigón debido a cargas dinámicas.

Figura A-4-9: Colocación de strain gauge dinámico (Fuente: Mn Road Test)

h.- Celda de Presión Dinámica del Suelo (*Dynamic Soil Pressure Cell*) (PG)

Es una celda de medición de presión dinámica del suelo. Son sensores de presión vertical y se usan para medir la distribución de tensiones verticales en las capas de base granular y subrasante. Se puede investigar la relación de esta distribución de tensiones con el comportamiento de dependencia de tensiones de material no ligado. Estos sensores son celdas de tensión de suelos de gran diámetro que consisten en dos platos metálicos circulares soldados por los bordes para crear una celda de aproximadamente 152,4 mm de

espesor. El espacio entre los platos se llena de líquido. Un tubo metálico conecta el líquido a un transductor de presión eléctrico colocado a varias pulgadas de la celda. El transductor de presión responde a los cambios en la tensión total aplicada al material en el cual la celda está embebida.

Existen otros dispositivos (PK) de 50,8 mm de diámetro y 12,7 mm de espesor, con el transductor de presión dentro de la celda.

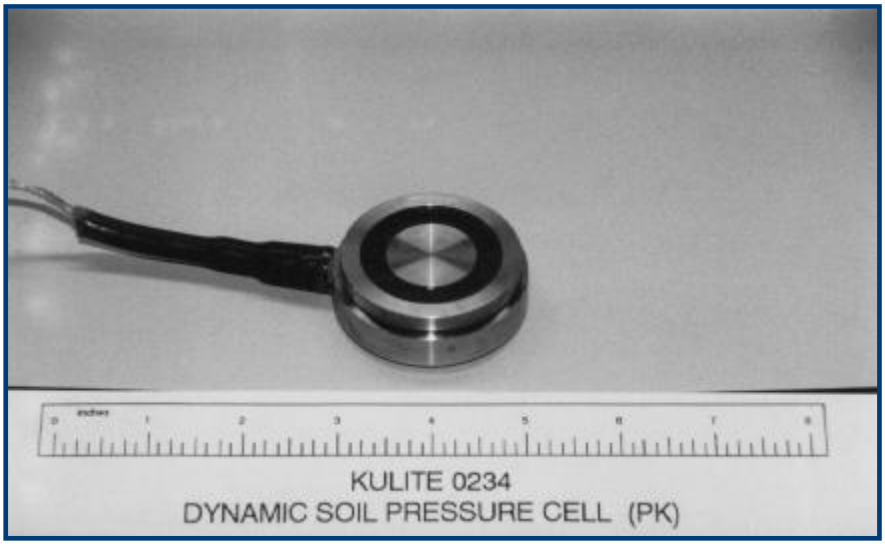

Figura A-4-10: Celda de presión dinámica del suelo (Fuente: Mn Road Test)

Este sensor esta embebido en la capa superficial del concreto cerca de la superficie y del fondo de la losa, en la zona donde pasa el neumático.

i.- Piezo-acelerometro

Mide la aceleración vertical del pavimento de hormigón debida a la acción de un vehículo. La deformación vertical puede ser calculada de la aceleración utilizando una doble integración.

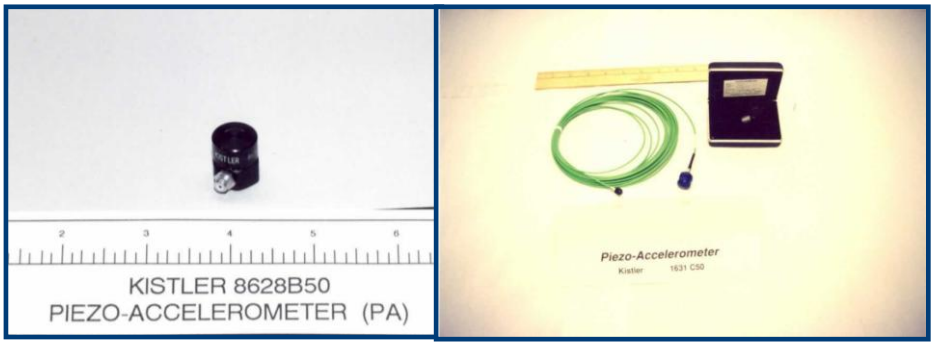

Figura A-4-11: Piezo-Acelerómetro y accesorios (Fuente: Mn Road Test)

j.- ***Tiltmeter***

Se usan para correlacionar los desniveles (pendiente) en diferentes puntos de la losa con las tensiones de largo plazo medidas. Estos sensores utilizan transductores electrolíticos de precisión para detectar movimiento angular. Utilizan el principio de que una burbuja suspendida en una caja con un líquido, siempre se bisecta por el vector de gravedad vertical. A medida que el transductor se inclina, la caja se mueve alrededor de la burbuja, cambiando linealmente la resistencia eléctrica medida a través del electrolito.

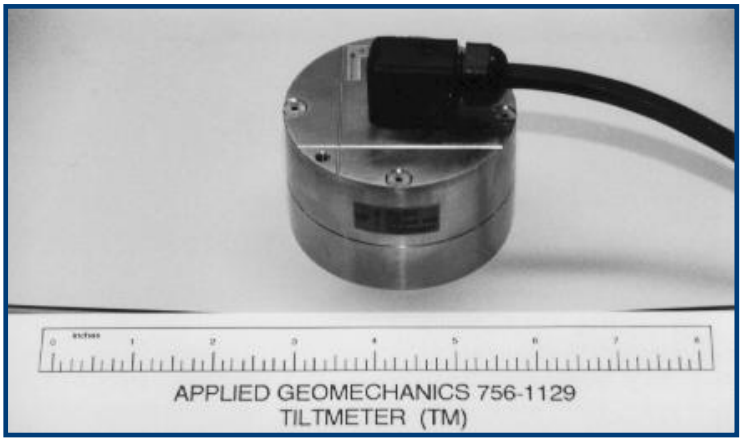

Figura A-4-12: Equipo *Tiltmeter* (Fuente: Mn Road Test)

k.- Otros dispositivos

-***Concrete vibrating wire strain gauge*****:** Consiste en un alambre tensado que se ancla entre dos pestañas y se rodea por un tubo protector. El alambre se excita mecánicamente,

causando que vibre a su frecuencia natural. La frecuencia resonante del alambre cambia con la tensión. Así, la tensión ejercida en las pestañas se relaciona con la frecuencia de vibración.

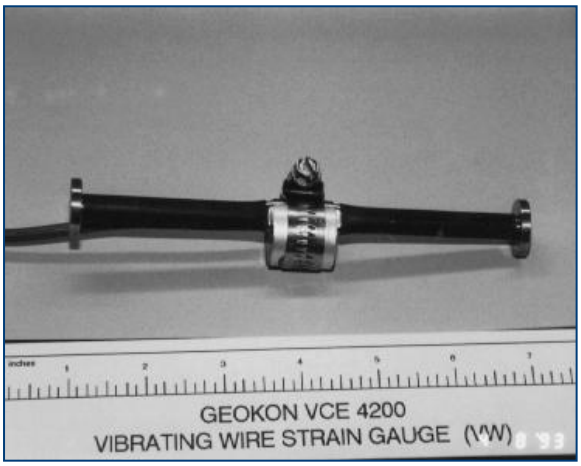

Figura A-4-13: Dispositivo *Vibrating Wire Strain Gage* (Fuente: Mn Road Test)

- ***Dynamic Pore Water Pressure Gauge***

  Se dividen en varios tipos, entre ellos se encuentran:

  - ***Dynamic Pore Water Pressure Cell* (DW):** Estos sensores se usan para medir el cambio rápido de poros de presión de los poros de agua positivos en suelos congelados sobresaturados sujetos a condiciones de cargas dinámicas.
  - ***Thermistor in Dynamic Pore Water Pressure Cell*:** Mide la temperatura en los sensores.
  - ***Open Stand Pipe*:** Es una tubería vertical en el suelo para medir el nivel freático.
  - ***Static Lateral pressure cell:*** Estos sensores se utilizan para medir la distribución de tensiones en la base, subbase y subrasante. Se basan en el principio de que la frecuencia de un alambre vibrando cambiará si éste se tensa o se suelta.

- ***Tipping Bucket:*** Miden la cantidad de agua que fluye fuera de los drenes que se han puesto en secciones seleccionadas.
- **Time Domain reflectómeter:** Miden la humedad no congelada de capas no ligadas de pavimentos.

ANEXO 5 :DEFLECTOMETRO DE IMPACTO

Historia de los deflectómetros de impacto

En los años 60, los ingenieros franceses estaban haciendo investigación en medición de capacidad de soporte y como realizar este tipo de mediciones. Los ensayos con Falling Weight Deflectometer (FWD) fueron detenidos, ya que los ingenieros prefirieron la viga Benkelman Francesa (Deflectógrafo Lacroix).

Figura A-5-1: Deflectómetro Lacroix

En Dinamarca, las posibilidades de aplicar un FWD para medir la capacidad de soporte fueron examinadas por primera vez en 1964 por dos estudiantes de la Danish University of Technology. La razón para probar este nuevo método, fue que no se podía medir la capacidad de soporte de caminos por medio de métodos de ensayo de plato estático.

Los principios de los dos métodos de medición utilizados en paralelo en los sesenta y los setenta eran:

- El Método Francés era el "*Wandering Benkelman Beam*" (El deflectómetro Lacroix). El principio de medición de este método es: Un camión avanza por el camino y se hacen mediciones de deflexión en forma continua a intervalos de 3m.

El otro método era el Falling Weigh Deflectómeter (FWD), que es el método aplicado actualmente.

FALLING WEIGH DEFLECTÓMETER (FWD)

La deflectometría de Impacto, generalmente se utiliza para la evaluación estructural de pavimentos asfálticos. El deflectómetro mide la deflexión dinámica (deflexión producida por una masa en movimiento), la fuerza del pulso se crea dejando caer , ya sea una masa, o un conjunto de dos masas, dependiendo del equipo) desde diferentes alturas, sobre una placa de carga circular de diámetro dado, que se encuentra apoyada sobre la superficie del camino. Variando la altura de caída, se puede crear una fuerza de impulso en el rango de 12 a 65 KN. En general, se simulan cargas de tránsito reales hasta 50 KN, lo que corresponde a un eje de 10 Toneladas. Las deflexiones son registradas por un número variable de sensores (geófonos o sismómetros), uno en el centro de la placa de carga y los otros a una distancia dada del centro, de forma de obtener el cuenco de deflexiones **(Figura A.5.3**).

Figura A-5-2: Deflectómetro de impacto del Laboratorio Nacional de Vialidad

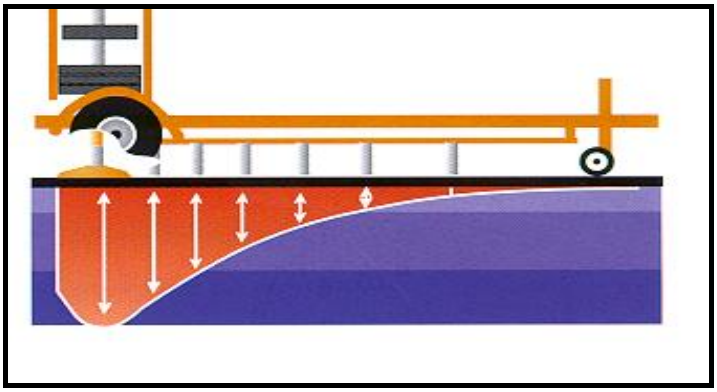

Figura A-5-3: Cuenco de deflexiones (Fuente: www.Dynatest.com)

Descripción del Equipo:

El equipo es un vehículo de arrastre, en donde van instalados los sistemas de aplicación de la carga, medida de deflexiones, todo cubierto por una carcaza metálica que lo protege. Además, se requiere un vehículo para trasladar (Remolcar) el equipo. Generalmente es en este vehículo en donde está instalado el sistema de control, El operador puede controlar todo el procedimiento de medición desde el vehículo, a través de un PC portátil, La placa de carga tiene un diámetro de 30 cm, y está recubierta de caucho para adaptarse mejor a la superficie del pavimento, el sistema de dos masas tiene la ventaja que la transmisión se realiza en forma suave (semejante a la forma en que los vehículos ejercen la carga sobre el pavimento). El sistema esta diseñado para ser insensible a los desniveles por deformación del pavimento.

El FWD mide la deflexión mediante transductores de deflexión denominados sismómetros, que usan un sistema de masa y resorte como referencia y un transductor diferencial LVDT como sensor. El rango de medida es de 0 a 5 mm. Dispone generalmente de 7 sismómetros que se colocan a voluntad del operador y según el tipo de estudio que se vaya a realizar.

Generalmente, para pavimentos asfálticos, lo sensores se ubican a 0, 20, 30, 45, 60, 90 y120 cm desde el centro del plato de carga.

Al mismo tiempo que se recogen los valores máximos de las deflexiones en los puntos de medida, se pueden almacenar también otro tipo de información tales como: la fuerza aplicada, fecha y hora de ejecución, temperatura del pavimento, y la posición del punto de ensaye, además de información de identificación: ruta, pista, tipo de pavimento, operador, etc.

Evaluación de la Capacidad Estructural

En la **Figura A-5-4** se presenta un diagrama esquemático de un pavimento sometido a una carga con un FWD. Al aplicar la carga, ésta se reparte a las capas inferiores, quedando representada por la zona cónica en la figura. La distinta inclinación de los lados, que varía para cada capa, se debe a la rigidez relativa o módulo de cada capa. Mientras mayor es el módulo de rigidez (material es más rígido), las tensiones se reparten sobre una área mucho mayor.

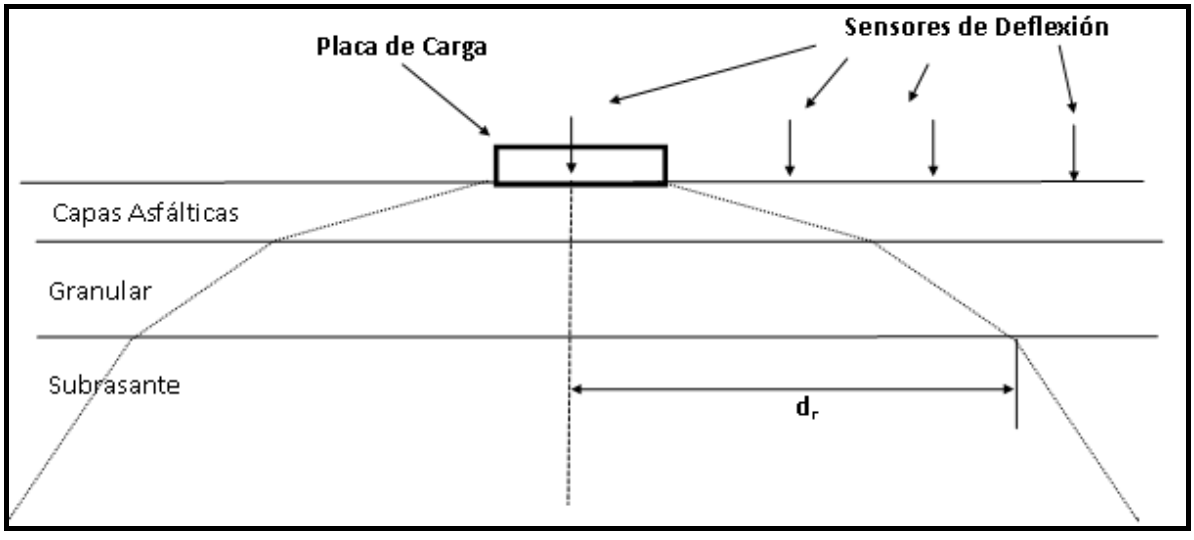

Figura A-5-4: Diagrama que representa la distribución de tensiones en un pavimento

donde:

dr = distancia radial en que la zona de tensiones intercepta la interfaz de la subbase y subrasante.

Al ejecutar la medición, toda deflexión superficial medida en o más allá de “dr” se debe solo a tensiones (deformaciones) en la subrasante. Así, las lecturas exteriores reflejan principalmente las propiedades del módulo in-situ de la subrasante. En base a lo anterior, se puede evaluar el módulo para cada capa. Esto se consigue mediante un retroanálisis. Además, se puede realizar una evaluación de la capacidad estructural del pavimento.

Retroanálisis:

La técnica de retroanálisis tiene como objetivo calcular todos los módulos de las capas que componen el pavimento. Este cálculo se basa en que , de acuerdo a la teoría de multicapas ,existe un conjunto de módulos tal que la deflexión teórica prevista es equivalente a la deflexión medida. A grandes rasgos, el procedimientoes el siguiente:

- Se determina el módulo de la subrasante
- Se avanza hacia el centro de la placa de carga, donde existirá una medición influenciada por la capa base y la subrasante, pero el módulo de la subrasante ya es conocido
- Se continúa sucesivamente con todas las otras mediciones y capas.

Cabe destacar que, para realizar este análisis, se requiere conocer el espesor de cada capa y el coeficiente de Poisson, al cual se le asigna un valor, de acuerdo al tipo de material.

Determinación del módulo resiliente:

El Módulo Resiliente se determina por retroanálisis de acuerdo a la expresión:

$$M_{RR} = \frac{2{,}4 \times P}{d_r \, r} \qquad \text{(A.5.1)}$$

y debe cumplirse que $\mathbf{r \geq 0{,}7\ a_e}$

donde:

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{RR}}} \right)^2} \qquad \text{(A.5.2)}$$

donde:

$$d_0 = 1{,}5\, p a \left[\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{RR}}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right] \qquad \text{(A.5.3)}$$

donde:

M_{RR} = módulo resiliente obtenido por retroanálisis, MPa

P = carga aplicada, KN

d_r = deflexión a la distancia r del centro de la carga, cm

r = distancia desde el centro del plato de carga al transductor, cm

a_e = radio del bulbo de tensiones en la interfaz subrasante, cm

a = radio de la placa de carga, cm

D = espesor total de las capas de pavimento sobre la subrasante

E_p = módulo efectivo de todas las capas de pavimento sobre la subrasante, MPa

d_0 = deflexión medida en el centro de la placa de carga, cm

p = presión de la placa de carga

Con los datos anteriores, se puede determina el número estructural efectivo del pavimento mediante la relación:

$$NE_e = 0{,}02364 D \sqrt[3]{E_p} \qquad \text{(A.5.4)}$$

donde:

D : espesor total de todas las capas sobre la subrasante, cm

E_p : módulo efectivo del pavimento, MPa

ANEXO 6: PROTOCOLO DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

En el presente protocolo propuesto se describe el procedimiento para la instrumentación de un pavimento asfáltico, de manera de poder determinar las deformaciones axiales provocadas por el paso de un vehículo. El objetivo es facilitar al usuario el uso de este equipamiento, y asesorar en cuanto a la toma de decisión de instrumentar un pavimento.

Consideraciones Previas

Antes de decidir instrumentar un pavimento, se deben tener en cuenta una serie de condicionantes, tales como:

- Se debe realizar una evaluación económica para determinar si se justifica asumir el costo asociado a la instrumentación, considerando los objetivos perseguidos.
- Para determinar las deformaciones producidas por el paso de un vehículo en un pavimento asfáltico, se debe disponer de equipos especializados, tanto para medición como para lectura.
- La cantidad y tipo de instrumentos de medición a utilizar dependerán de las capas que conforman el pavimento, o las capas en particular a estudiar.

A continuación se presenta una lista con el equipamiento recomendado para instrumentar una carpeta asfáltica:

Tabla A-VI-1: Recomendaciones de instrumentación a utilizar

Proveedor Recomendado	Instrumento	Cantidad
Dynatest	Strain Gages para medir deformación horizontal paralela al eje (Debe incluir el cableado necesario)	Mínimo 5
Dynatest	Strain Gages para medir deformación horizontal perpendicular al eje (Debe incluir el cableado necesario)	Mínimo 5
ETT	Datalogger para recolección de información, capaz de recibir la señal de 10 strain gages en forma simultánea y continua	1
Massload	Escala para pesaje de rueda de camión, portátil	1
Veto	Termómetros	Mínimo 2

Al respecto, se deben utilizar al menos cinco strain gages, ya que en la práctica es muy difícil asegurar que la rueda del camión pase exactamente sobre el instrumento, luego, estos cinco strain gages se deben colocar en paralelo, de tal modo que las mediciones formen una campana, que permita determinar el máximo valor de deformación. Por otro lado, también se deben colocar cinco strain gages perpendicular al eje, para poder determinar si la máxima deformación producto del paso de la rueda es en paralelo o perpendicular a la dirección de circulación del vehículo.

Se recomienda utilizar al menos dos termómetros: Uno en el medio de la capa asfáltica, y otro en la parte inferior de la misma. Además, es recomendable contar con un termómetro ambiental.

A continuación se presenta una estimación de los costos en instrumentación de una capa asfáltica:

Tabla A-VI-2: Costos en instrumentación

Ítem	**Descripción**	N°	**Proveedor Recomendado**	**Precio ($US)**	**Precio (Pesos)**
1	Strain Gages para instrumentación de pavimento asfáltico, capaces de medir tensión y deformación horizontal, que incluya el cableado necesario	10	Dynatest	7.500	4.200.000
2	Datalogger para recolección de información	1	National Instruments (*)	4.114	2.262.449
3	Escala para pesaje de rueda de camión, portátil	1	Massload	5.170	2.844.790
4	Termómetro	2	VETO	---	52.000

Notas: Valores correspondientes al año 2009.

(*) : El Distribuidor en Chile de National Instruments es ETT

Antes de continuar, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Los *Strain Gages* para asfalto son prácticamente irrecuperables. Esto implica que la inversión servirá para medir las propiedades de solamente un pavimento.

- A pesar de que en rigor, se puede medir las deformaciones del *strain gage* con un *Tester*, es recomendable la utilización de un *Datalogger*, debido a la gran cantidad de mediciones simultáneas que se deben realizar, y a que esto permite capturar mayor cantidad de datos, y con una precisión mucho mayor.

- Al momento de realizar la medición, asegurarse de que la rueda del camión pase por el centro del grupo de instrumentos.

- Si al momento de la colocación de los instrumentos, estos quedan desalineados, ya sea en forma paralela o perpendicular al eje, la medición obtenida perderá confiabilidad.

Si al tener en cuenta todas estas consideraciones, se decide instrumentar un pavimento, el procedimiento recomendado a seguir es el siguiente:

1. Instalación de Strain Gages HPAST

Antes de instalar los instrumentos, es recomendable realizar pruebas de medición, para verificar su buen funcionamiento.

Se requieren ciertas técnicas para colocar los diferentes tipos de instrumentos. Es importante mencionar que la compactación de las capas de pavimento en el sector en que se hayan instalado los HPAST se realiza con un rodillo no- vibratorio. No se debe aplicar compactación vibratoria, ya que la vibración puede dañar o mover los instrumentos. También es recomendable utilizar rodillos neumáticos para compactar la capa de concreto asfáltico.

Los strain gages para asfalto se instalan cuando la capa de base granular ha sido construida y compactada. Para asegurar una instalación exitosa de los strain gages, se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- Aplicar una imprimación en el área en que se colocará el transductor. Se debe dejar curar la imprimación .En caso de aplicar una dosis excesiva de riego de imprimación, agregar arena.

Figura A-6-1: Imprimación de la zona de colocación del H-PAST

- Una vez que haya curado la imprimación, colocar una capa de 3-4mm de mezcla arena/asfalto sobre la imprimación asfáltica. Sobre éste, colocar el strain gage. Presionar las barras de anclaje del transductor en la mezcla hasta que se produzca contacto entre la barra de strain gage y la mezcla. Esperar a que cure la mezcla asfalto/arena que está afirmando el strain gage. Se debe asegurar que las barras de anclaje permanezcan en su posición hasta que se complete el curado.

Figura A-6-2: HPAST colocado sobre la imprimación

- Formar un canal de 3 a 4 cm de profundidad, desde el strain gage hasta el borde del pavimento. Verter una capa delgada de arena fina limpia en el fondo, y colocar el cable para el H-PAST a través de la canaleta. El cable no debe estar tenso. Se recomienda que sea doblado al menos una vez cerca del instrumento, para asegurar flexibilidad si se tira el cable. Se puede usar una banda adhesiva de caucho para asegurar el cable doblado en su lugar. Cubrir el cable con arena u otro material fino similar (Sin piedras grandes). Humedecer la arena o aplicar una dosis de imprimante ayuda a acomodar el cable.

Figura A-6-3: Acomodamiento de cables de H-PAST

- Una vez que ha curado la mezcla de arena/asfalto que afirma los HPAST, se aplica la capa de imprimación asfáltica sobre toda el área superficial que será pavimentada. Esta corresponde a la Imprimación que normalmente de debe realizar a cualquier base granular antes de colocar la capa asfáltica.

- Antes de colocar la capa de mezcla asfáltica en caliente, se debe esperar hasta que cure la imprimación.

- Inmediatamente antes de extender la capa de asfalto, tomar un poco de mezcla en caliente de la *finisher*. Quitar las piedras más grandes y cubrir el transductor con una capa de 2 a 3 cm de espesor .El transductor debe quedar completamente cubierto por la mezcla.

Figura A-6-4: Colocación de Mezcla en Caliente sobre el transductor

- Compactar el material utilizando un plato metálico o directamente el pie, y aplicando presión estática parándose encima del plato (sin saltar sobre el plato).

Figura A-6-5: Compactación preliminar

- Se puede completar la compactación inicial utilizando un "rodillo" de 10 cm de diámetro, 20 cm de largo y 14Kg de peso. Compactar el asfalto caliente en la dirección de las barras de anclaje solamente.
- Eventualmente se puede aplicar una compactación final, utilizando un rodillo liviano, como se muestra en la **Figura A-6-6**, pero siempre evitando vibrar, ni compactar en la dirección del strain gage.
- Finalmente, compactar la capa asfáltica utilizando un rodillo neumático

Figura A-6-6: Compactación Final

- Para asegurar que el HPAST o su cable no se hayan dañado durante la instalación, se debe medir la resistencia eléctrica (esta debe ser aproximadamente 120 Ohm).

Recomendaciones

- No se debe hacer rodar el compactador en la dirección del *strain gage*, ya que ello induciría tensiones iniciales en la celda.
- No aplicar vibración alguna de compactación al usar rodillo metálico o cualquier otro equipo de compactación vibratorio.
- Al momento de realizar la medición, asegurarse de que la rueda del camión pase por el centro del grupo de instrumentos.
- Es importante asegurarse al momento de la colocación de la los instrumentos queden lo más alineados posibles, ya sea paralelo o perpendicular al eje, de manera de que la medición sea lo más exacta posible.