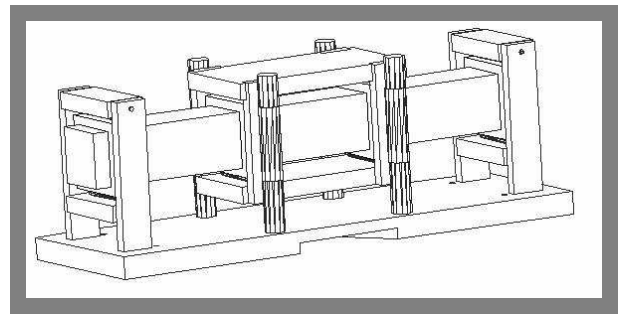


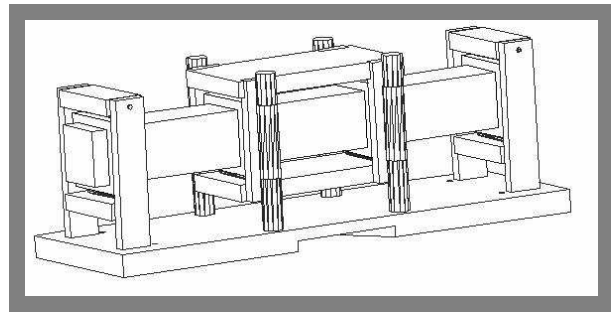
**AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS DINÁMICOS DEL LABORATORIO DE
PAVIMENTOS EN EL EQUIPO N.A.T. (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER) DE LA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**



**EDUARDO DUSSÁN NAVARRO
FERNANDO FLAUTERO VALENCIA**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2005**

**AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS DINÁMICOS DEL LABORATORIO DE
PAVIMENTOS EN EL EQUIPO N.A.T. (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER) DE LA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**



**EDUARDO DUSSÁN NAVARRO
FERNANDO FLAUTERO VALENCIA**

**Trabajo para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director
MARIA PATRICIA LEÓN NEIRA
Ingeniero Civil**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2005**

TABLA DE CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO CONCEPTUAL	14
1.1 COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	14
1.1.1. Deformación.	14
1.1.2. Módulos.	17
1.1.3. Fatiga en mezclas asfálticas.	19
1.2. ENSAYOS DINÁMICOS DE FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	20
1.2.1. Métodos de ensayo para hallar la resistencia a la fatiga.	21
1.2.2. Ensayos dinámicos de fatiga en mezclas asfálticas realizados en la Universidad Javeriana.	22
2. EL EQUIPO N.A.T. (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER) DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA	23
2.1 PARTES DEL EQUIPO	24
2.1.1 Marco de carga.	24
2.1.2 Sistema hidráulico	25
2.1.3 Sistema de adquisición de datos y paneles de control	25
2.1.4 Transductores.	27
2.1.5. Cámara de temperatura controlada.	28
3. OPTIMIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS REALIZADOS EN EL EQUIPO N.A.T. DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.	30
3.1. DESCRIPCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.	30
3.1.1. Módulo resiliente de mezclas asfálticas.	30
3.1.2. Resistencia a la deformación permanente bajo carga sostenida	30
3.1.3. Resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida.	31

3.1.4. Fatiga de mezclas asfálticas	31
3.2. OPTIMIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO N.A.T.	31
3.2.1. Hardware del equipo NAT.	31
3.2.1.1. Transductores.	31
3.2.1.2 Control de temperatura en los ensayos	32
3.2.1.3. Caracterización de la celda carga.	32
3.2.1.4. Sistema hidráulico.	33
3.2.1.5. Mantenimiento eléctrico y electrónico.	33
3.2.1.6. Cámara de temperatura controlada.	33
3.2.2. Software de los ensayos en el equipo N.A.T.	34
3.2.2.1. Software de calibración del equipo NAT	34
3.2.2.2 Software de los ensayos:	35
3.2.2.3. Implementación de lógica difusa con conocimientos del operario.	35
3.3. OTRAS POSIBLES OPTIMIZACIONES PARA EL EQUIPO N.A.T.	36
3.3.1 Mantenimiento mecánico.	36
3.3.2 Criterio de falla en el ensayo de fatiga.	36
3.3.3. Observaciones generales.	37
4. ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN EL EQUIPO N.A.T. NORMA EN 12697-24 Y ASSTHO TP8-94	38
4.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA.	38
4.1.1 Objetivo del ensayo.	38
4.1.2 Normatividad del ensayo de fatiga en cuatro puntos en muestra prismática de mezcla asfáltica.	38
4.1.3 Procedimiento del ensayo.	39
4.1.4 Comparación de las normas del ensayo de fatiga en cuatro puntos en muestra prismática de mezcla asfáltica	39
4.2. DISEÑO.	40
4.2.1. Diseño de las formaletas.	41
4.2.2. Diseño de la estructura.	42
4.2.3. Requisitos para la construcción de la estructura	43

4.3. HARDWARE ASOCIADO A LA CAPTURA, ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL EQUIPO N.A.T. PARA EL ENSAYO DE FATIGA EN 4 PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA	43
4.4. SOFTWARE ASOCIADO AL PROCESAMIENTO, CÁLCULO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS DEL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA.	44
4.4.1. Selección del lenguaje de programación.	44
4.4.2. Desarrollo del software PRISMEF4P® Versión 1.0.	45
4.4.2.1. Pánel de control	45
4.4.2.2. Estructura del código de programación en lenguaje G.	45
4.5. COSTOS	46
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
5.1. CONCLUSIONES	47
5.2. RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50
BIBLIOGRAFIA ELECTRÓNICA.	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Deformación permanente, respuesta ideal.....	15
Figura 2. Acumulación de la deformación permanente bajo cargas repetidas.	16
Figura 3. Deformación permanente por esfuerzo cortante.	17
Figura 4. Módulo complejo.	18
Figura 5. Propagación de cargas.	18
Figura 6. Tipos de ensayos de flexión y tensión sobre mezclas bituminosas.....	20
Figura 7. Montaje de un ensayo	21
Figura 8. Carga para esfuerzo y deformación	21
Figura 9. Equipo N.A.T. de la Pontificia Universidad Javeriana.	23
Figura 10. Marco de Carga.....	25
Figura 11. Soporte del sistema, servoválvula y pistón.	25
Figura 12. Vista frontal panel de temperatura.	26
Figura 13. Vista frontal de la tarjeta de acondicionamiento.....	26
Figura 14. Celda de carga.....	27
Figura 15. Tipos de LVDT's del equipo NAT.....	27
Figura 16. Termocupla tipo K.	28
Figura 17. Cámara de temperatura controlada.....	28
Figura 18. Protector de corriente.....	33
Figura 19. Ventana Calcheck	34
Figura 20. Ventana Thermal	34
Figura 21. Almacenamiento de muestras.....	37
Figura 22. Apoyo en 4 puntos y distribución de carga.....	39
Figura 23. Sistema de ensayo 4 puntos.	40
Figura 24. Sistema de ensayo 4 puntos.	40
Figura 25. Sistema de ensayo 4 puntos.	40
Figura 26. Formaleta para creación de muestras asfálticas (AASHTO).....	41
Figura 27. Estructura del ensayo en 4 puntos implementado (vista 3D)	42
Figura 28. partes y montaje del sistema de ensayo en 4 puntos	42
Figura 29. Maquinaria	43
Figura 30. Panel de control PRISMEF4P	45
Figura 31. Diagrama del software PRISMEF4P	46

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Transductores, pistón.

Anexo B. Control PID y lógica difusa

Anexo C. Diseño de estructura.

Anexo D. Programa PRISMEF4P

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores que afectan la resistencia a la deformación permanente.	16
Tabla 2. Especificaciones de la máquina	24
Tabla 3. Disposición de los canales de la tarjeta.	26
Tabla 4. Especificaciones de la cámara N.A.T.	29
Tabla 5. Requisitos mínimos para el ensayo de cuatro puntos.	44
Tabla 6. Costos de la estructura	46

GLOSARIO

ALGORITMO: Conjunto finito de instrucciones que sirven para ejecutar una tarea o resolver un problema.

AUTOCERO: Calibración que sirve para iniciar las medidas en una referencia de cero.

BOBINADO: Núcleo rodeado con espiras de material conductor por el cual pasa una corriente produciendo un campo electromagnético.

CARGA SINUSOIDAL: Carga cuyo valor varía en forma senoidal con respecto al tiempo.

DEFLEXIÓN: Medida de deformación de un pavimento que representa una respuesta del sistema ante la aplicación de una carga externa.

LABVIEW: Software de la empresa National Instruments para adquisición, control, análisis y presentación de datos.

MATERIAL LINEAL. Es un material cuya relación esfuerzo deformación es independiente del esfuerzo de carga aplicada.

MÓDULO COMPLEJO. Es un número complejo que define la relación entre esfuerzo y deformación para un material visco elástico lineal, E^* .

MÓDULO DINÁMICO: Es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal $|E^*|$.

MOSFET: Dispositivo de potencia para amplificar señales en circuitos de control de motores.

PUENTE DE WHEATSTONE: Circuito de acondicionamiento para sensores que utilizan métodos de comparación o de deflexión entre dos puntos, generando un coeficiente de proporcionalidad.

PUNTO DE FALLA: Ciclo de carga en el cual la muestra presenta el 50% de la reducción de la resistencia a la deformación con respecto a su deformación inicial.

SERVOAMPLIFICADOR: Pequeñas máquinas diseñadas para controlar el posicionamiento con la variación de voltaje.

SERVOVÁLVULA: Válvula capaz de abrir, cerrar y regular presión y caudal de un circuito neumático o hidráulico.

TERMOCUPLA.: Sensor que consta de dos piezas de distintos metales unidas en uno de sus extremos para la detección de variaciones de la temperatura.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es plantear la optimización de algunos de los procesos de los ensayos dinámicos desarrollados con el equipo N.A.T. (Nottingham Asphalt Tester) en el laboratorio de pavimentos de la Pontificia Universidad Javeriana y la implementación del ensayo de fatiga en cuatro puntos de una muestra prismática en el mismo equipo.

Para la optimización de estos ensayos dinámicos se realizaron estudios en donde se comparan los procedimientos dados por las normas y los ejecutados en el equipo N.A.T. de la universidad, evaluando la capacidad y calibración de las partes del equipo.

En la implementación del ensayo de cuatro puntos se realizaron diseños sobre la elaboración de una estructura que cumpliera con las normas del ensayo y se acondicione a las dimensiones del equipo existente además de la creación del software del ensayo y acondicionamiento del hardware.

Con este trabajo se pretende dar a la universidad una validación de los resultados de los ensayos dinámicos existentes de mezcla asfáltica y el estudio de la implementación del ensayo de cuatro puntos de mezcla bituminosa.

ABSTRACT

The objective of this work is to show the optimization of some processes of the dynamic tests developed with the N.A.T. (Nottingham Asphalt Tester) equipment on the pavement's laboratory of the Pontificia Universidad Javeriana's University and the implementation of the four point fatigue test on the same equipment.

For the optimization of these tests studies were made where the procedures given by the norms and executed in equipment N.A.T. of the university are compared, evaluating the capacity and calibration of the parts of the equipment.

In the implementation of the four point fatigue test designs were made over the structure's elaboration. A structure that fulfills the norms of the test and being prepared to the equipment. Besides a software was created and a hardware test too.

This work ties to give to the university an improvement in the results of the actual pavements tests and the study of the implementation of the four point's fatigue test of bituminous mixture.

INTRODUCCIÓN

Colombia, según el Instituto Nacional de Vías INVIAS¹, en la actualidad cuenta con una red vial nacional a su cargo con una longitud de aproximadamente 16.641 Km. de los cuales se encuentran pavimentados 12.232 Km. correspondientes al 73% del total de las vías nacionales; de este porcentaje el 70% se encuentran pavimentadas con asfalto, mostrando la preferencia de los pavimentos flexibles para carreteras. Dentro de esta longitud las condiciones de la red vial son en un 67% buenas, en un 25% regulares y en un 8% malas. Según Cano² un pavimento puede estar bien diseñado, pero una vez construido falla a edad temprana, debido entre otros factores a la falta de controles estrictos durante el proceso de elaboración de mezclas asfálticas, colocación y puesta en servicio del pavimento.

Para llevar a cabo dichos controles sobre las mezclas asfálticas se implementan ensayos dinámicos en los laboratorios de pavimentos, apoyados en teorías de elasticidad y leyes de fatiga que muestran el comportamiento de estructuras de pavimentos de forma confiable al caracterizar la mezcla bituminosa a las condiciones reales.

Esto conlleva a que en los últimos años se adquirieran en los laboratorios de pavimentos nuevos equipos para poder realizar ensayos dinámicos de las mezclas asfálticas.

En la actualidad la Pontificia Universidad Javeriana cuenta con equipos de laboratorio especializados para los ensayos dinámicos de las muestras asfálticas, uno de ellos es el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester) sobre el cual se estudiarán diferentes aspectos para mejorar e implementar ejecución de ensayos dinámicos.

¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Colombia 2004. Disponible en : www.invias.gov.co/info/red_vial/red_vial.asp

² CANO GOMEZ, Luis Fernando. Reevaluemos los pavimentos. Bogotá: 1995.

1. MARCO CONCEPTUAL

Las mezclas asfálticas se conforman de material pétreo con una gradación definida y de productos asfálticos con características físicas determinadas; Estas mezclas son elaboradas en el lugar que se van a utilizar o en planta fija. Las mezclas de mejor calidad son las que se elaboran en planta fija, porque el producto asfáltico se reparte con mayor uniformidad en los agregados.

Existen diferentes métodos para el diseño de mezclas asfálticas. Entre ellos se encuentra el método Marshall y el Hveem, los cuales fueron utilizados durante gran parte del siglo pasado. Estos métodos no consideraban el efecto de las cargas cíclicas en la durabilidad del pavimento.

Las mezclas asfálticas tienen la propiedad de formar una carpeta compacta con el mínimo de vacíos, ya que se usan materiales gradados, lo cual hace que sean uniformes, resistentes a las deformaciones producidas por las cargas y prácticamente impermeables.

Las mezclas asfálticas son diseñadas para resistir el envejecimiento y las fallas causadas por cargas de tráfico y los cambios de las condiciones ambientales. Las fallas más comunes son el ahuellamiento, fatiga y fisuras debidas a variaciones de temperatura. En las últimas décadas se han centrado los estudios en la disminución de estas fallas a edades tempranas del pavimento.

1.1 COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

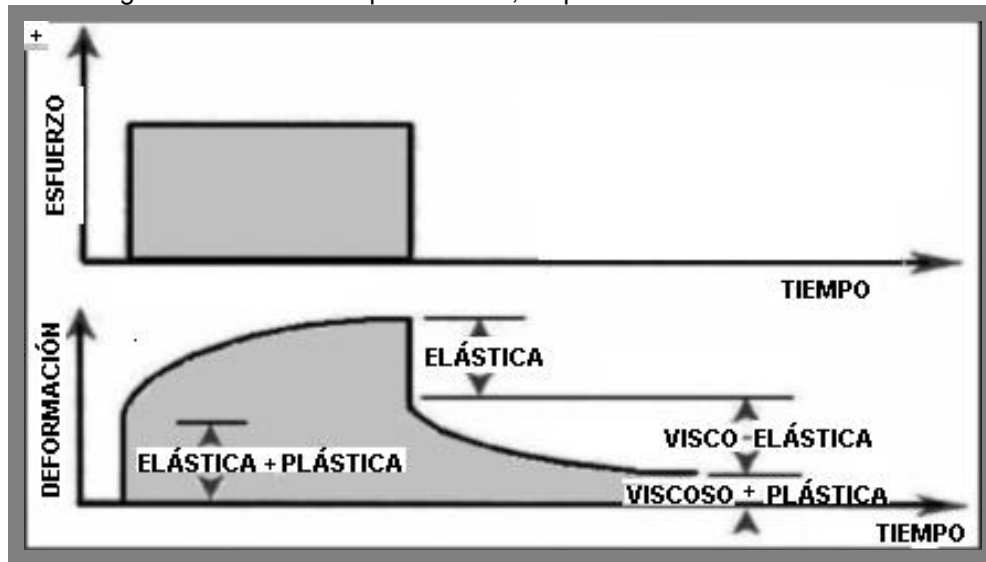
1.1.1 Deformación. Para una muestra de mezcla asfáltica sujeta a un esfuerzo de compresión σ , La deformación ε esta dada por una expresión que relaciona la deformación unitaria “d” con la longitud original de la muestra “l”.

Ecuación 1: Deformación unitaria.

$$\varepsilon = \frac{d}{l}$$

La falla causada por el efecto de esfuerzos verticales de compresión en la capa asfáltica de un pavimento se llama deformación permanente, y esta se manifiesta con el fenómeno de ahuellamiento bajo la superficie de carga de las llantas, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Deformación permanente, respuesta ideal



Fuente: Bituminous Pavements, University of Nottingham

En ensayos dinámicos de flexión, se aplica una carga a una muestra asfáltica en donde el esfuerzo induce a la muestra a una deformación como se observa en las ecuaciones 2 y 3.

Ecuación 2: Esfuerzo dinámico.

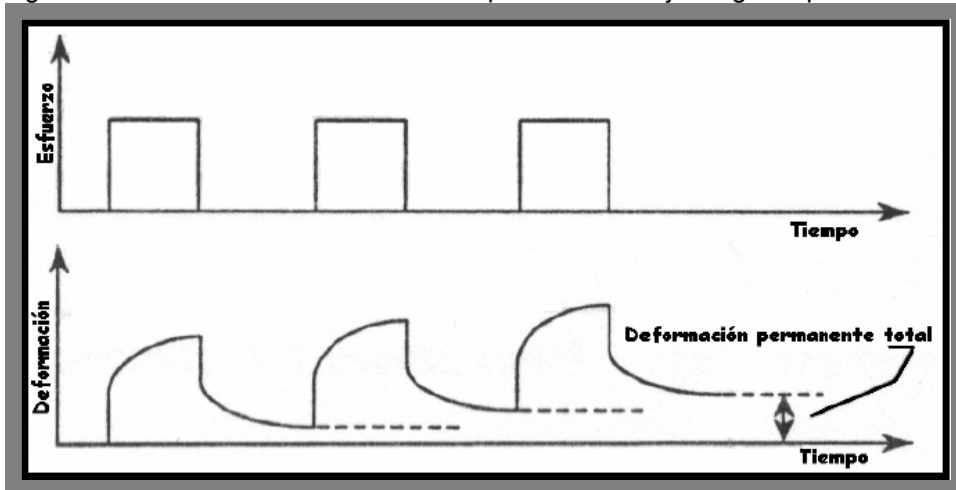
$$\sigma(t) = \sigma_0 \times \sin(\omega t)$$

Ecuación 3: Deformación

$$\xi(t) = \xi_0 \times \sin(\omega t + \varphi)$$

Donde σ_0 y ξ_0 son los valores máximos del esfuerzo axial y la deformación respectivamente, w es la frecuencia angular y φ es el retraso de fase. Parte de la deformación permanecerá después de retirar la carga. Esta deformación permanente puede ser una combinación de la deformación viscosa del ligante de la capa y de la deformación plástica en la estructura del agregado causada por el desplazamiento relativo de las partículas del agregado. La magnitud de la deformación permanente causada por una sola aplicación de carga es baja, pero el efecto es acumulativo; en la Figura 2 se observa la acumulación de la deformación permanente bajo cargas repetidas.

Figura 2 Acumulación de la deformación permanente bajo cargas repetidas.



Fuente: Bituminous pavements, University of Nottingham.

La resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación permanente depende principalmente de las propiedades del ligante y de la composición volumétrica de la mezcla, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores que afectan la resistencia a la deformación permanente.

	Parámetro	Cambio en el parámetro	Ahuellamiento
Agregado	Textura	Liso a rugoso	Incremento
	Gradación	Abierta a continua	Incremento
	Forma	Redondeada a angular	Incremento
	Tamaño	Incremento en el tamaño máximo	Incremento
Ligante	Módulo Dinámico	Incremento	Incremento
	Contenido de ligante	Incremento	Decremento
	V_v^b	Incremento	Decremento
	VMA ^c	Incremento	Decremento
Mezcla	Compactación	— ^e	— ^e
	Temperatura	Incremento	Decremento
	Esfuerzo/Deformación	Incrementa en la presión de contacto de la llanta	Decremento
Condiciones Ensayo/Campo	Repeticiones de Carga	Incremento	Decremento
	Agua	Seco a húmedo	Decremento

A. Se refiere al módulo dinámico a la temperatura a la cual la tendencia al ahuellamiento está siendo determinada. Se pueden utilizar modificadores para elevar el módulo dinámico a temperaturas críticas y de este modo reducir el potencial de ahuellamiento.

B. Cuando el volumen de aire (V_v) es menor que el 3%, el potencial de ahuellamiento aumenta.

C. Volumen de vacío, igual a la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto ($V_v + V_b$)

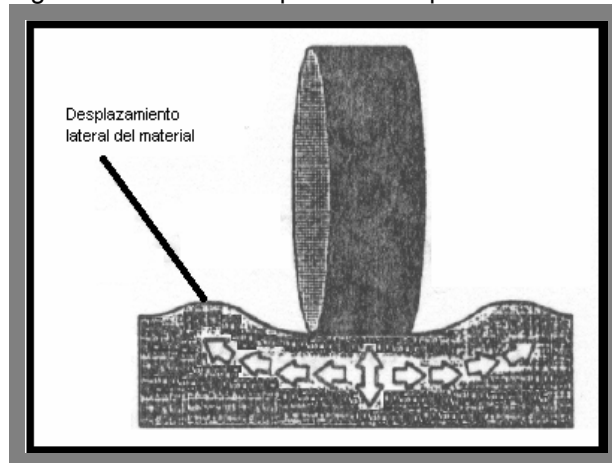
D. Se ha argumentado que a muy bajo volumen de vacío (menor que 10%) debe ser evitado.

E. Cualquiera de los métodos de compactación (campo o laboratorio) pueden influir en la estructura del sistema y por consiguiente en la tendencia al ahuellamiento.

Fuente: Bituminous pavements, University of Nottingham

La deformación permanente en mezclas asfálticas se debe principalmente al esfuerzo cortante sin presentar cambio de volumen, como lo muestra la Figura 3. La acumulación de la deformación permanente bajo cargas repetidas causadas por el tránsito vehicular puede llevar a la formación de asentamientos longitudinales (huellas) en la trayectoria de la rueda. Este ahuellamiento se desarrolla donde el pavimento esta sujeto a elevadas temperaturas y/o cargas de larga duración. En estas condiciones el módulo dinámico del ligante es bajo y las propiedades viscosas dominan, incrementando su tendencia al flujo y facilitando el desarrollo de la deformación plástica.

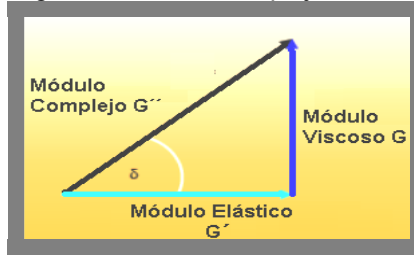
Figura 3. Deformación permanente por esfuerzo cortante.



Fuente: Bituminous pavements, University of Nottingham.

1.1.2 Módulos. El módulo es función del esfuerzo y la deformación (figura 4) en donde σ es el esfuerzo y ξ la deformación. El módulo complejo E^* Se define como la suma vectorial del módulo viscoso y el módulo elástico (figura 4), como lo muestra la ecuación 4, módulo de rigidez y módulo complejo.

Figura 4. Módulo complejo.



Módulo de rigidez.

$$E = \frac{\sigma}{\xi}$$

Ecuación 4:

Módulo complejo.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)}{\varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \delta)}$$

El módulo se puede expresar en forma exponencial (Ecuación 5) o en forma general (Ecuación 6). El módulo complejo se caracteriza por un par de componentes³, La coordenada real toma la parte elástica (eje real x). La coordenada imaginaria, representa el comportamiento viscoso (eje imaginario y).

Ecuación 5: Módulo complejo de forma exponencial.

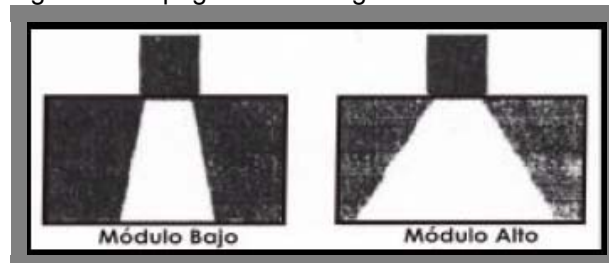
$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \frac{e^{i\omega t}}{e^{i(\omega t - \delta)}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\delta} = |E^*| \cdot e^{i\delta}$$

Ecuación 6: Módulo complejo de forma general.

$$e^{i\delta} = \cos\delta + i \cdot \text{sen}\delta \text{ y } |E^*| = \sigma_0 / \varepsilon_0$$

A la magnitud del módulo complejo de una muestra asfáltica se le denomina módulo dinámico; este depende tanto del tiempo como de la temperatura, ya que proporciona información de cuanto se deforma el material bajo la acción de una carga dada y está relacionado al fisuramiento por fatiga, a la deformación permanente y a la propagación de una carga en una capa asfáltica, por tal razón, es una de las propiedades más importantes de una mezcla asfáltica. La figura 5 muestra la propagación de cargas según el módulo.

Figura 5. Propagación de cargas.



Fuente: NAT Course notes, University of Nottingham.

³ European Standard, Stiffness of Bituminous Mixtures.

La relación entre el esfuerzo cortante y la deformación en función del tiempo de aplicación de carga y de la temperatura define al módulo dinámico. De manera ideal, se puede afirmar que a altas temperaturas de servicio (alrededor de 60°C) el cemento asfáltico debe tener un módulo alto con el fin de evitar la presencia de ahuellamientos. Por otra parte, el módulo del cemento asfáltico a temperaturas de servicio bajas debe ser menor con el fin de evitar el fisuramiento de la capa asfáltica por contracción térmica. Teniendo altas temperaturas de servicio, se puede obtener un incremento de la resistencia al ahuellamiento mediante la correcta selección del agregado y diseño de la mezcla.

1.1.3 Fatiga en mezclas asfálticas. El fenómeno de fatiga se puede definir como el proceso permanente, progresivo y localizado de cambio de las condiciones estructurales de un material sometido a tensiones repetidas y consecuentemente deformaciones inducidas y que en el caso de las muestras asfálticas culmina con la aparición de fisuras y grietas que conducen a la rotura total después de un número suficiente de repeticiones.

Según Reyes⁴ “Los materiales se pueden romper si se les aplica repetidamente un gran número de solicitaciones cuya amplitud sea menor que su resistencia a la ruptura instantánea”, por tanto en los ensayos dinámicos de fatiga la muestra se somete a una carga constante y repetitiva hasta llegar a la ruptura de la misma, lo cual genera resistencia a la fatiga y se puede expresar con el número de ciclos y el esfuerzo aplicado. Por lo tanto el modo de aplicación de carga sea esfuerzo o deformación controlada, la forma de onda de aplicación de la carga, los periodos de relajación y las características de las mezclas asfálticas entre otros son factores que afectan los ensayos de fatiga.

El agrietamiento en pavimentos debido a fatiga bajo carga repetida ha sido reconocido por muchos años como la forma más común de falla. Medina (1985) señaló en Brasil que en pavimentos asfálticos con capa de base granular, alcanzan la falla por un intenso agrietamiento por fatiga y raramente por deformación permanente. (Se quita y se reacomoda esta línea) Brown y Brunton (1984) han definido el término fatiga como “falla en el pavimento como resultado de aplicaciones repetidas de deformación bajo el nivel al cual causa ruptura en una aplicación simple”. El agrietamiento por fatiga de la capa resulta de deformaciones repetidas a la tensión en el fondo de esta capa. Las grietas comienzan en el fondo de la capa y entonces se propagan hacia arriba causando pérdida de módulo de resiliencia lo cual alterará la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura total de pavimento y en el suelo de la subrasante.

La causa de falla por fatiga está relacionada con las características resilientes de cada componente del pavimento. En pavimentos con bases estabilizadas y superficie de

⁴ REYES, Fredy. Diseño racional de pavimentos. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2003. P125

rodamiento delgada, es inevitable una cierta cantidad de agrietamiento y las grietas normalmente se reflejan a través de la superficie del asfalto.

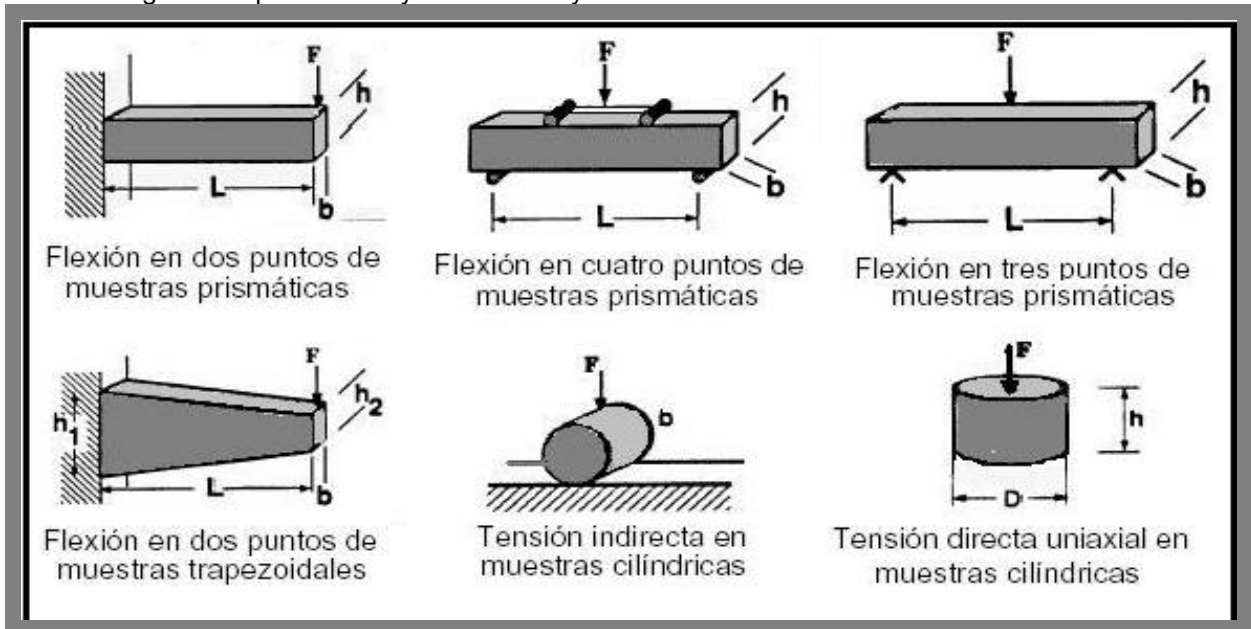
- Límite de fatiga: A la relación entre el valor de la magnitud de la carga y el número de ciclos que se aplica a esta carga hasta llegar a la ruptura se denomina límite de fatiga; esta relación es muy difícil de encontrar en mezclas asfálticas cuando hay variaciones de la magnitud de la carga debido a que se puede llegar a un valor de fatiga en cualquier momento.

1.2 ENSAYOS DINÁMICOS DE FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Para un diseño de pavimentos es necesario conocer las diferentes estructuras de pavimento y sus respectivos comportamientos mecánicos; además, estudiar las propiedades de los materiales asfálticos con criterios sobre su utilización en distintos ambientes, aprovechando la información de tráfico disponible y las propiedades de los materiales granulares para poder emitir juicios sobre su utilización y estabilización y de esta manera, estimar su vida útil.

Existen varias pruebas para determinar el módulo dinámico de mezclas asfálticas, usando muestras con geometrías específicas a cada prueba. Las muestras son sometidas a deformación en su rango lineal bajo cargas repetidas o cargas con tasa de deformación controlada. En la Figura 6 se observan los tipos de ensayos de flexión y tensión que se pueden desarrollar en mezclas asfálticas.

Figura 6. Tipos de ensayos de flexión y tensión sobre mezclas bituminosas



1.2.1 Métodos de ensayo para hallar la resistencia a la fatiga. Los métodos de ensayo de la resistencia a la fatiga se clasifican en tres tipos: flexión simple, carga axial directa y carga diametral.

Flexión simple:

- Flexión de la viga cargada en el punto central.
- Flexión de la viga con 4 puntos.
- Flexión de la viga cantilever rotatoria.
- Flexión de la viga de dos puntos (cantilever trapezoidal).

Carga axial directa:

- Tensión y compresión de un espécimen cilíndrico.
- Tensión y compresión de un espécimen con angostamiento.

En la figura 7 se observa el montaje de una muestra cilíndrica en un equipo diseñado para ensayos dinámicos de resistencia a la fatiga. Con respecto al esfuerzo y a la deformación controlada se muestra la forma en que la carga es aplicada en el tiempo. (Figura 8).

Figura 7. Montaje de un ensayo

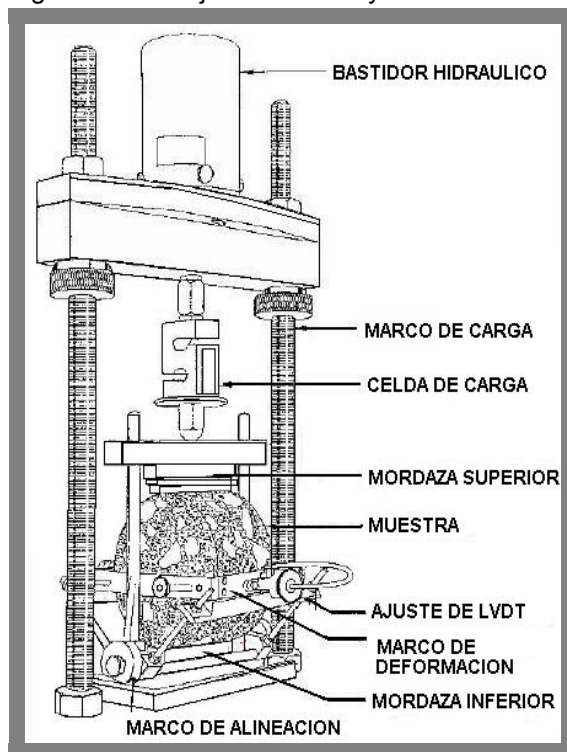
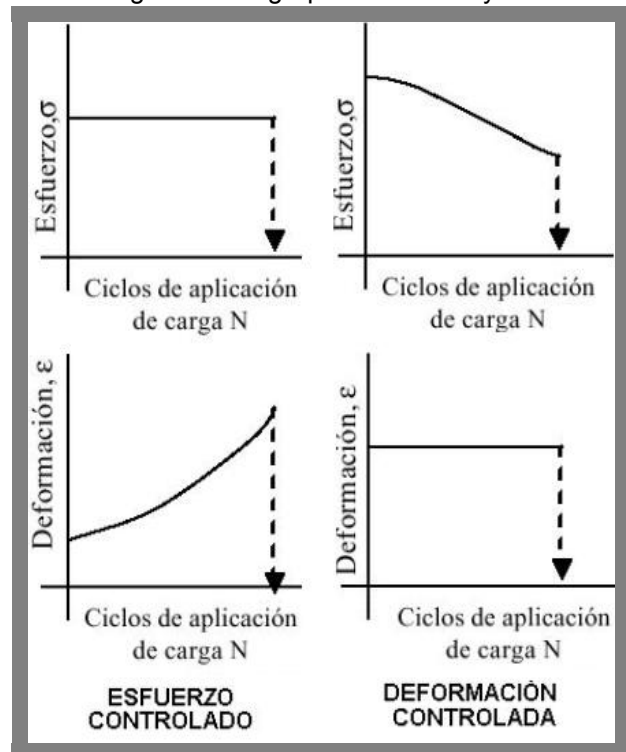


Figura 8. Carga para esfuerzo y deformación



Fuente: Apuntes de clase de diseño de pavimentos, Ing. Javier Ortiz

1.2.2 Ensayos dinámicos de fatiga en mezclas asfálticas realizados en la Universidad Javeriana. Los ensayos dinámicos que se presentan siguen muy de cerca los procedimientos estándar sugeridos por la Sociedad Americana para los Ensayos de Materiales (ASTM), la Asociación de Agencias Oficiales de Carreteras y Transporte (AASHTO), Norma Europea y Normas INVIAS.

En el laboratorio de pavimentos se realizan ensayos sobre el asfalto (peso específico, ductilidad, punto de ablandamiento, adherencia en bandeja, envejecimiento de asfaltos); Sobre las mezclas asfálticas (estáticos y dinámicos) y sobre materiales granulares (CBR, equivalente de arena), entre otros.

Los ensayos dinámicos sobre mezclas asfálticas desarrollados por la universidad son:

- Módulo Resiliente de mezclas asfálticas, INV E 749.
- Resistencia a la deformación bajo carga sostenida (Tres temperaturas), Norma BSI DD 185.
- Resistencia a la deformación bajo carga repetida, Norma EN 12697-24.
- Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio, INV E 756.
- Fatiga de mezcla asfálticas tensión indirecta, Norma EN 12697-24.
- Fatiga de mezclas asfálticas en probetas trapezoidales.

2. EL EQUIPO N.A.T. (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER) DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

El equipo Nottingham Asphalt Tester (N.A.T.) fue diseñado por la empresa “Cooper Research Technology” para evaluar las propiedades mecánicas de materiales asfálticos para pavimentos (Figura 9); esta máquina permite la realización de nuevos diseños de mezcla, la caracterización de nuevos materiales, la valoración de pavimentos en servicio y el control de calidad entre otras aplicaciones.

Figura 9. Equipo N.A.T. de la Pontificia Universidad Javeriana.



El N.A.T. usa un computador por medio de una interfaz de adquisición de datos para realizar las pruebas y procesar los datos obtenidos de los ensayos dinámicos, para este fin utiliza un software especialmente desarrollado, que guía al usuario paso a paso en cada procedimiento.

El equipo N.A.T. de la Universidad Javeriana consta de las características mencionadas en la tabla 2, en donde se muestran especificaciones y parámetros como temperatura de trabajo, materiales a trabajar y los instrumentos de medición entre otros.

Tabla 2. Especificaciones de la máquina.

1	Nombre EQUIPO N.A.T.	No de serie CR7-260999/TCC	Código 80944	Modelo HY270999	
2	Fabricante COOPER RESEARCH TECHNOLOGY	Dirección BARDSEY, LEEDS. UK LS17 9BB		Marca MASTRAD	
3	Vendedor INGENIERÍA DE SERVICIOS LTDA.	Dirección CRA 53 # 71 A 31		Teléfono 2255143 - 2259062	
4	Costo de compra £ 46,357,000	costo de instalación INCLUIDO		Total (fecha de adquisición) 02 - 11 - 99	
5	Fecha de instalación 02 - 11 - 1999	Voltaje 220	Wattiaje	R.P.M. 50 - 60 Hz	Dimensiones 2,5m3
6	Temperatura -10 °a 50 °C	Peso 180 Kg.		Presión	Posición VERTICAL
7	Trabaja con aire	Compresor	Trifásica	<input checked="" type="checkbox"/> hidráulica	Presión
8	Materiales a trabajar ASFALTOS	Espacio aéreo de utilización 2,63 m			
9	Longitud de carrera 2,63 m				
10	Instrumentos de medición CELDA DE CARGA TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA.	Escala de medición _KPa			
11	Monitor y C.P.U. SIEMENS NIXDORF PLACA N. 69144	Controles MANUAL - AUTOMÁTICO.			

Fuente: Tavera 2002, Notas del NAT

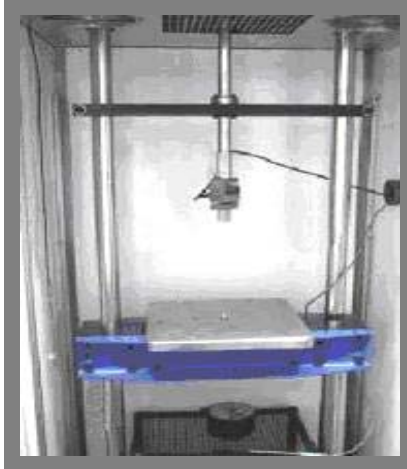
2.1 PARTES DEL EQUIPO

El equipo consta de: el marco de carga, un sistema hidráulico, el sistema de adquisición de datos con panel de control, transductores y la cámara de temperatura controlada.

2.1.1 Marco de carga. El marco de carga se muestra en la figura 10 y consta de:

- Una placa base con una incisión centrada que asegura otras estructuras más pequeñas.
- Dos columnas.
- Una cabeza móvil en acero inoxidable que soporta al cilindro pistón y en el movimiento genera deflexiones mínimas.
- Un cilindro pistón hidráulico para la aplicación de cargas verticales de 0 a 10 kN con frecuencias hasta de 50 Hz y con una exactitud de 0,001 kN.
- Una servo válvula conectada al cilindro pistón y controlada por una señal de corriente eléctrica desde un servo amplificador.
- Un LVDT (transductor de desplazamiento) fijado en la parte superior del móvil.
- Una celda de carga que puede medir fuerzas hasta de 20 kN, atornillada a la barra de extensión del cilindro pistón.

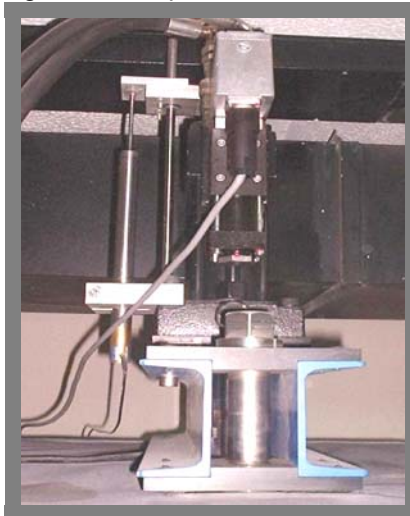
Figura 10. Marco de Carga.



El marco de carga servo-hidráulico facilita la realización de las pruebas con muestras elaboradas en laboratorio (briquetas) o directamente de la vía (núcleos),

2.1.2 Sistema hidráulico. El sistema hidráulico compuesto de bomba eléctrica y tanque tiene una potencia de 2,2 kW. La función del sistema hidráulico es suministrar aceite hidráulico por medio de dos mangueras, una de salida y una de retorno a la presión y temperatura correcta al sistema servo válvula y cilindro pistón (Figura 11). El encendido y apagado de la bomba eléctrica es controlado por un tablero de control.

Figura 11. Soporte del sistema, servo válvula y pistón.



2.1.3 Sistema de adquisición de datos y paneles de control. El sistema de adquisición de datos y el módulo de control comprenden una unidad de interfase y una tarjeta multifunciones.

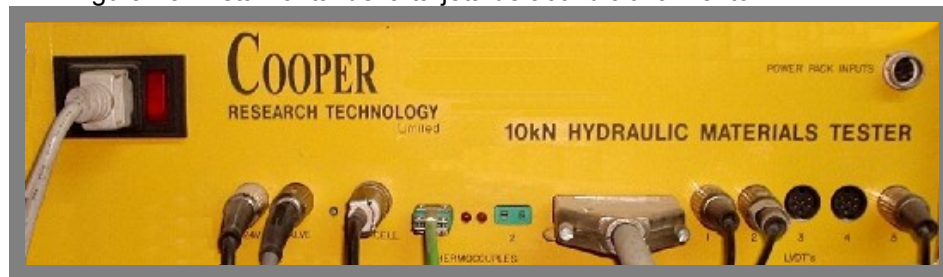
La figura 12 muestra el panel de control de temperatura y su visualización digital.

Figura 12. Vista frontal panel de temperatura.



Por medio de una interfase, de una fuente y un circuito que acondiciona los datos se obtienen las señales de la bomba, la servo válvula, la celda de carga, las termocuplas y los transductores de desplazamiento (LVDTs). La conexión se muestra en la figura 13.

Figura 13. Vista frontal de la tarjeta de acondicionamiento.



Este equipo presenta una tarjeta multifunciones de 8 canales (0 a 7) de 16 bits, de conversión analógica a digital para las entradas de longitud, temperatura y fuerza al software, en donde cada canal recibe una señal analógica en el rango de -10 a $+10$ voltios y la convierte a un número binario entre -32.768 y $+32.767$ BIT que contiene la información de entrada al software del computador. La tabla 3 muestra la conexión de los instrumentos a su respectivo canal.

Tabla 3. Disposición de los canales de la tarjeta.

Canales	Elemento conectado
0	Celda de carga
1	LVDT 1
2	LVDT 2
3	LVDT 3
4	LVDT 4
5	LVDT del cilindro pistón
6	Termocupla 1
7	Termocupla 2

También la tarjeta multifunciones tiene dos canales de 16 bits de conversión digital a análoga de salida, que son los canales que envían información del computador al equipo. Cada convertidor digital a análogo (DAC) recibe un número binario en el rango -32.768 a $+32.768$ BIT desde el computador y lo convierte en un voltaje en el rango de -10 a $+10$ voltios. El canal cero (0) está conectado a la servo válvula por medio de la interfase digital y la salida del canal uno (1) está conectada a la bomba.

2.1.4 Transductores. Son los dispositivos que convierten las magnitudes físicas en señales eléctricas, codificadas en forma análoga o digital. En la figura 14 se observa una celda de carga utilizada para medir variaciones de fuerza del cilindro pistón. La celda de carga junto a los transductores de desplazamiento LVDTs. (Transformador Diferencial de Variación Lineal) presentan los valores de esfuerzo aplicado y deformación obtenida.

Figura 14. Celda de carga.



Un LVDT consiste de un bobinado primario, dos bobinados secundarios iguales y una armadura magnética móvil. El bobinado primario funciona con corriente alterna y los dos bobinados secundarios son conectados para que su salida combinada represente la diferencia en el voltaje inducido en ellos. El movimiento de la armadura cambia esta salida y produce una salida de corriente alterna que es proporcional a la distancia de la armadura desde la posición central (salida cero).

Figura 15. Tipos de LVDT's del equipo NAT



El equipo NAT cuenta con LVDTs de varias clases como lo muestra la figura 15; un par de LVDT tipo IT que tienen un recorrido de 25mm y una sensibilidad de $0,25\mu\text{m}$ y un par de LVDT tipo PD que cuentan con un recorrido de 9mm y una sensibilidad de $1\mu\text{m}$. El LVDT del pistón mide la posición del émbolo en sus 70mm de recorrido y tiene una sensibilidad de $10\mu\text{m}$.

La figura 16 presenta los transductores de temperatura implementados en el equipo NAT que son las termocuplas tipo K, que se utilizan para controlar la temperatura de las muestras de mezcla asfáltica dentro de la cámara y tienen un rango de medición de -10 a $+100^{\circ}\text{C}$, con una precisión de $0,1^{\circ}\text{C}$.

Figura 16. Termocupla tipo K.



2.1.5 Cámara de temperatura controlada. La cámara de temperatura controlada CRT 625 puede establecer temperaturas en el rango de -10°C a $+60^{\circ}\text{C}$, con una fluctuación en la temperatura dentro de la cabina de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ y una unidad de cambio de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Figura 17. Cámara de temperatura controlada



La cámara de temperatura presenta las siguientes especificaciones generales como lo muestra la tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones de la cámara N.A.T.

Rango de temperaturas	-10°C hasta + 60°C
Enfriamiento	395 g. R404a
Capacidad de refrigeración	560W
Capacidad de calentamiento	1.5KW
Conexión	230V
Volumen	625L - 22 cu ft
Dimensiones	L2000mm*P815mm*A710mm
Peso	195kg

3. OPTIMIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS REALIZADOS EN EL EQUIPO N.A.T. DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.

Los ensayos realizados en el equipo N.A.T. están normalizados con metodologías americanas (ASTM) y europeas (E.N.) las cuales tienen distintos criterios que influyen en los resultados de los ensayos. A continuación se describen los ensayos dinámicos realizados por la universidad en el equipo N.A.T. y se analizan los cambios referentes al equipo para la realización del ensayo.

3.1. DESCRIPCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.

3.1.1. Módulo resiliente de mezclas asfálticas. El objetivo del ensayo es determinar dos valores de módulos resilientes: El módulo resiliente instantáneo, que se calcula empleando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga de un ciclo y el módulo resiliente total, que se calcula empleando la deformación recuperable total, que incluye tanto la deformación recuperable instantánea, como la deformación recuperable dependiente del tiempo, que continúa durante la descarga y el resto del período de reposo de un ciclo. El ensayo se lleva a cabo aplicando cargas de compresión de forma ondulada. La carga se aplica verticalmente en un plano diametral de un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico. La deformación horizontal resultante del espécimen se mide, y este dato junto con el coeficiente de Poisson asumido se emplea para calcular el módulo resiliente. Los especímenes normalmente tendrán diámetros de 102 ó de 152 mm (4" ó 6"). La franja de carga deberá tener 13 ó 19 mm (0.5 pulgadas ó 0.75 pulgadas) de ancho para tales diámetros, respectivamente. Los bordes deberán redondearse por tallado para no cortar la muestra durante el ensayo.

Se realizan comparaciones de los procedimientos de laboratorio que se llevan actualmente con las normas. Luego de analizar el ensayo de módulo resiliente de mezclas asfálticas por el método de tensión indirecta realizado en el equipo NAT de la Pontificia Universidad Javeriana se concluye que cumple con los parámetros establecidos en las normas americanas y europeas.

3.1.2. Resistencia a la deformación permanente bajo carga sostenida. El objetivo del ensayo es determinar las características de deformación de una mezcla asfáltica, con aplicaciones de carga en muestras cilíndricas preparadas en el laboratorio o núcleos tomados en campo con dimensiones de 98mm o 148mm de diámetro y altura de 60mm. El esfuerzo de compresión axial expresado en kPa, que se le aplica estáticamente a la muestra, es de 100 ± 2 kPa. La aplicación de la carga a la muestra es de forma constante después de una precarga. La temperatura en todo el proceso es de 20 grados centígrados.

Se realizan comparaciones de los procedimientos de laboratorio que se llevan actualmente con las normas. Luego de analizar el ensayo de resistencia a la deformación bajo carga sostenida realizado en el equipo NAT de la Pontificia Universidad Javeriana se concluye que cumple con los parámetros establecidos en las normas americanas y europeas.

3.1.3. Resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida. El objetivo del ensayo es determinar las características de deformación de una mezcla asfáltica. Para muestras cilíndricas preparadas en el laboratorio y núcleos tomados en campo, con diámetros de 98mm o 148mm y altura de 60mm. El esfuerzo de compresión axial expresado en kPa, que se le aplicará a la muestra una carga repetida de 100 ± 2 kPa hasta que se apliquen un número N de repeticiones establecidas.

Se realizan comparaciones de los procedimientos de laboratorio que se llevan actualmente con las normas. El ensayo de resistencia a la deformación bajo carga repetida de la Universidad cumple con los parámetros establecidos en las normas.

3.1.4. Fatiga de mezclas asfálticas. El objetivo del ensayo es determinar la vida de fatiga de una muestra usando el método de tensión indirecta con muestras cilíndricas preparadas en el laboratorio o núcleos tomados en campo. La carga se aplica verticalmente en un plano diametral de un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico. Se miden la deformación horizontal y el número de aplicaciones de carga para llevar a la muestra a una falla por fractura.

En la universidad se realiza el ensayo con un nivel de esfuerzo inicial de 600 kPa, El esfuerzo inicial debe ser de 500kPa para determinar el número de ciclos de falla $N_f(500)$ como se establecen en las normas.

3.2. OPTIMIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO N.A.T.

A continuación se muestra una optimización tanto en hardware como en software del equipo NAT de la universidad teniendo en cuenta las variables y los procedimientos de ensayo.

3.2.1. Hardware del equipo NAT.

3.2.1.1. Transductores. Son los elementos que miden las condiciones de trabajo, (temperatura y deflexiones). Por lo tanto se debe tener bastante precaución en el manejo de estos. El anexo A. presenta las características de los transductores.

En el equipo NAT de la universidad se debe tener en cuenta lo siguiente:

Los cables de los sensores se encuentran totalmente sueltos dentro del equipo. Se debe enrollar cualquier exceso de cable para mantener el orden y de esta manera evitar accidentes con los desplazamientos de las partes móviles. Además cuando se utilizan los dispositivos móviles se debe encintar los cables de los LVDTs a dichos dispositivos para reducir el riesgo de daño. Estos procedimientos no son complicados, así que se pueden generar resultados óptimos y evitar mantenimiento mas frecuente.

3.2.1.2 Control de temperatura en los ensayos. Es esencial el control de la temperatura, tanto en el almacenamiento previo al ensayo como en el mismo ensayo. Se observa en ensayos anteriores del laboratorio que un cambio en la temperatura puede causar una variación significativa en los resultados de rigidez. Por lo tanto se deben verificar que la lectura de las termocuplas corresponda a la temperatura en el pánel de control del equipo N.A.T. Las termocuplas del laboratorio son de tipo K, cuyas características son:

- Material: Cromo y Alumel
- Buena resistencia a la oxidación
- Rango: 0°C a +1.370°C y 600°C a 1.000°C en atmósferas oxidantes
- Precisión: $\pm 1^\circ\text{C}$ y calibración

La optimización consiste en la verificación de la correspondencia de las temperaturas de las termocuplas y del pánel de control del equipo antes de iniciar el ensayo, ya que las correlaciones dadas por el software están basadas en las lecturas de las termocuplas y que deben ser iguales a la temperatura del medio en el cual se desarrolla el ensayo. Para este fin se debe tener en cuenta la correcta hermetización de la cámara, con la revisión de todos los empaques, tanto los de la puerta como los empaques localizados en el acceso de los cables de los sensores. También es importante la correcta conexión y calibración de las termocuplas.

3.2.1.3. Caracterización de la celda carga. La celda de carga mide el nivel de esfuerzo en la probeta durante el ensayo, además de tener controlada la deformación y la frecuencia. La celda de carga en la probeta es del tipo SM-1000N (Metric súper mini load cell) marca interface[®], la cual entrega los datos de manera análoga en un rango de voltajes de 0 - 3 milivoltios.

Ahora para poder leer esta información de carga que entregan estas mini celdas, es necesario acondicionar la señal debido a que las señales emitidas son muy pequeñas, y además muy sensibles a mezclarse con ruido externo. Para optimizar estas señales se puede implementar un sistema de amplificación de señales y así obtener una respuesta más clara de la señal. Estos sistemas se presentan con mayor detalle en el anexo A).

3.2.1.4. Sistema hidráulico. El cilindro pistón tiene por defecto la capacidad de aplicar cargas de 0 a 10kN a frecuencias superiores a 50Hz y con una exactitud de 0,001kN. La servo válvula conectada al cilindro pistón es controlada por una señal de corriente eléctrica desde un servo amplificador. El transductor de la celda de carga es un dispositivo calibrado que puede medir fuerzas hasta 20kN. La experiencia ha demostrado que este tipo y disposición de la celda de carga es muy confiable.

La potencia del sistema hidráulico de 2 Kw. se puede aumentar para generar mayor carga, sobretodo para ensayos dinámicos de carga sostenida, teniendo en cuenta también la implementación de un control electrónico para la aplicación de carga. En el anexo B se muestran los sistemas de control que pueden ser aplicados al equipo N.A.T.

3.2.1.5. Mantenimiento eléctrico y electrónico. El sistema debe contar con un mantenimiento del protector de corriente con personal especializado, que permita proteger elementos de alto costo y fragilidad ante cambios bruscos de tensión, como son las electro válvulas, servo válvulas, micro interruptores de seguridad, motor principal, módulo de control y adquisición de datos, computador y cámara de temperatura controlada. Es la parte más delicada del equipo y por esto debe estar bien protegida y estabilizada eléctricamente. Este mantenimiento debe llevar un historial en la hoja de vida del equipo.

Figura 18. Protector de corriente



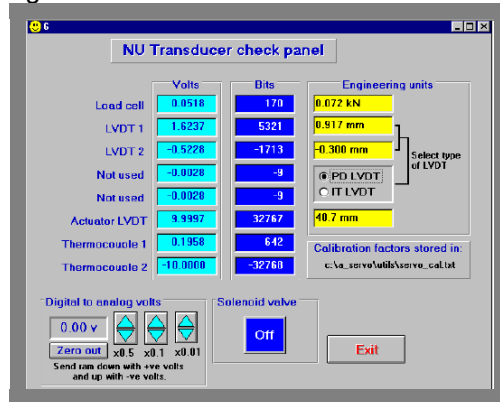
3.2.1.6. Cámara de temperatura controlada. La cámara permite controlar la temperatura al 0,2°C de precisión desde -10°C hasta 60°C, utilizando un controlador de temperatura digital. Una circulación de aire forzado sobre el calentador, las alabes de enfriamiento y a través del tubo de aire en la pared posterior asegura una temperatura uniforme dentro de la cámara. El agua condensada circula por un tubo detrás de la cámara hasta una bandeja calentada, situada debajo de la cámara donde se evaporará. La cámara ofrece además sistema de seguridad para la regulación de la temperatura que detiene o enciende los ventiladores previniendo el calentamiento o el enfriamiento. La puerta delantera es de doble vitraje y contiene un elemento calentador para asegurar la constante claridad de la puerta de cristal. La cámara de temperatura controlada trabaja actualmente de manera óptima para el desarrollo de todos los ensayos.

3.2.2. Software de los ensayos en el equipo N.A.T. El equipo NAT presenta software de calibración de los sensores, actuadores y software para cada uno de los ensayos dinámicos en un lenguaje amigable a usuario desarrollados por la empresa National Instruments.

3.2.2.1. Software de calibración del equipo NAT

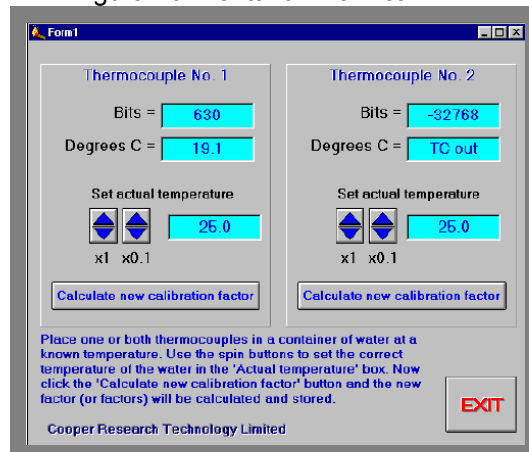
- Calcheck: Es el software encargado de la calibración de la instrumentación en el equipo NAT. Los factores de calibración son almacenados en el archivo servo_cal.txt. El procedimiento de calibración se debe realizar únicamente por un personal acreditado.

Figura 19: Ventana Calcheck



- Thermal: El programa Thermal realiza la calibración de las dos termocuplas. Para este fin se sumergen ambas termocuplas en un recipiente que contenga agua a una temperatura conocida, luego se corrige la temperatura de las termocuplas en el recuadro de temperatura actual (set actual temperature) de la ventana Thermal, respecto de la temperatura del agua, utilizando las flechas. Luego se oprime el botón de calibración y quedan calculados los nuevos factores de calibración.

Figura 20. Ventana Thermal



- Caltry: Programa para calibrar los transductores del marco de carga y se usa para verificar que el LVDT y los transductores de la celda de carga estén correctamente conectados garantizando que la servoválvula responda desde el computador. Se debe tener especial precaución de no correr Caltry cuando el marco de carga tenga una muestra o algo que impida al bastidor moverse libremente pues el bastidor puede llegar a torcer su barra de extensión y la celda de carga. Este procedimiento se debe realizar únicamente por personal técnico capacitado.

3.2.2.2 Software de los ensayos:

- ITSM: Software para determinar el módulo dinámico elástico de mezclas asfálticas, aplicando una tensión indirecta diametral para alcanzar una deformación horizontal objetivo (deformación controlada) en muestras cilíndricas.
- ITST: Software para determinar el módulo dinámico elástico de mezclas asfálticas, aplicando una tensión Indirecta diametral a un esfuerzo objetivo (esfuerzo controlado) en muestras cilíndricas.
- CREEP: Software para determinar la deformación permanente de mezclas asfálticas por medio de la aplicación de carga estática uniaxial sin confinamiento en muestras cilíndricas.
- RLA: Software para determinar la deformación permanente de mezclas asfálticas por medio de la aplicación de carga dinámica uniaxial sin confinamiento en muestras cilíndricas.
- ITFT: Software para determinar la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas, por medio de la aplicación de tensión indirecta a un esfuerzo objetivo (esfuerzo controlado) en muestras cilíndricas.
- RLT: Software para realizar pruebas de carga repetida axial (pulsos de carga) en muestras cilíndricas, utilizando transductores para medir deformaciones axiales y radiales. Este software puede usarse para la realización de ensayos de vacío triaxial o inconfinado.

3.2.2.3. Implementación de lógica difusa con conocimientos del operario.

Teniendo en cuenta que no siempre las muestras son idénticas, axial procedan del mismo origen, los módulos pueden variar en el momento del ensayo. En la optimización del ensayo es necesario validar estos datos de los módulos de la muestra obtenidos con ensayos dinámicos de muestras de similares características. Una alternativa para validar estas condiciones es la correlación con módulos tomados por la máquina anteriormente e incluirlos en un software con aplicación de lógica difusa para su auto calibración. (Ver el anexo B para conocer con mayor profundidad los controles difusos).

Los procesos sobre el equipo N.A.T. para la aplicación de lógica difusa se divide en dos partes, la primera es la lógica operativa dada por el usuario como la acomodación de la celda de carga a la muestra y los LVDTs. La segunda es con respecto a los intervalos de tiempo de carga del pistón sobre las muestras, las variaciones en los tiempos de carga (Rise time) se pueden corregir mediante la aplicación de lógica difusa.

3.3. OTRAS POSIBLES OPTIMIZACIONES PARA EL EQUIPO N.A.T.

3.3.1 Mantenimiento mecánico. Para mantener un resultado óptimo el mantenimiento tiene que ser riguroso, empezando por mantener una limpieza general en la zona de ensayos (cámara y bastidor), cada vez que se realice un ensayo, las partículas de agregados que puedan quedar sobre las diferentes superficies ocasionan con el tiempo corrosión y pueden obstruir partes móviles.

Si las columnas del bastidor se van a usar en periodos superiores a una semana deben ser lubricadas con vaselina neutra. Preferiblemente después de cada ensayo deben limpiarse y nuevamente lubricarse.

3.3.2 Criterio de falla en el ensayo de fatiga. El criterio actual de falla en los ensayos de fatiga evalúa la vida de las muestras (ciclos de falla) hasta que estas alcanzan una reducción del 50% en su rigidez inicial (stiffness). Dicho criterio ha sido estudiado los últimos años según Lundstrom, Benedetto e Isacsson⁵, estableciendo discrepancias en cuanto a una falla real de las muestras. La tasa de reducción de la rigidez en las mezclas asfálticas depende de la temperatura del ensayo, de la composición de las mezclas, del tipo de ligante y del comportamiento de las muestras a las aplicaciones de carga. Estos criterios pueden ser examinados en los ensayos con ayuda de correlaciones matemáticas, midiendo deflexiones o por exámenes visuales de las muestras.

La fatiga de una estructura de calzada se manifiesta la mayor parte del tiempo por la aparición en superficie de degradaciones cuyo análisis constituye la base de todos los métodos de evaluación del estado de la calzada. La toma de estas degradaciones se efectúa en el terreno de manera visual. Existen equipos que pueden realizar exámenes visuales de la superficie de la capa asfáltica de un pavimento mediante fotografías continuas en tramos determinados.

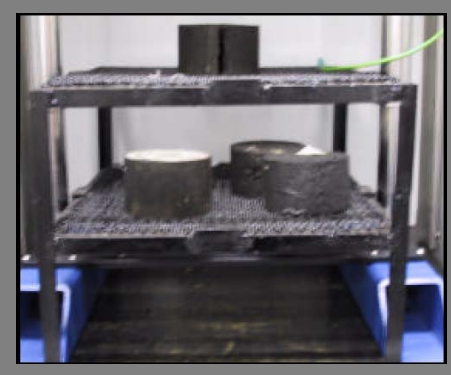
El equipo N.A.T. puede tener una optimización de sensores ópticos y de procesamiento de imágenes permite la implementación de observaciones del comportamiento de los agregados a la aparición de fracturas y generando un criterio estructural de falla, ya que el agregado es quien soporta las cargas. Estas fracturas se pueden dar sin que la muestra haya alcanzado el criterio actual de falla y de a.C. la necesidad de implementar en el equipo N.A.T. estos procedimientos y criterios. Estos equipos pueden ser implementados fácilmente en nuestro país, ya que no se requiere de alta tecnología, simplemente equipos de captura de imágenes con resoluciones aceptables y software de procesamiento de imagen.

⁵ ASCE, Journal of materials in civil engineering. November- December 2004. P 516

3.3.3. Observaciones generales. El fabricante da una serie de recomendaciones que se deben llevar con estricto cumplimiento. Algunas recomendaciones a mejorar son:

- El compartimiento del compresor y en particular del condensador, deben permanecer limpios y libres de polvo. Se recomienda utilizar una aspiradora para este fin.
- Para asegurar el correcto y eficiente flujo de aire en la cámara, las muestras deben almacenarse en un estante como puede observarse en la figura 21.

Figura 21. Almacenamiento de muestras.



Fuente Lab. De pavimentos Universidad Javeriana.

4. ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA EN EL EQUIPO N.A.T. NORMA EN 12697-24 Y ASSTHO TP8-94

En la Pontificia Universidad Javeriana se realizan ensayos de fatiga en mezclas asfálticas por el método de tensión indirecta y flexión en viga trapezoidal. El ensayo de fatiga en cuatro puntos caracteriza de manera más real el comportamiento de la mezcla asfáltica debido a las características geométricas de la muestra y su forma de recibir las cargas. En el equipo N.A.T. de la Universidad es posible realizar el ensayo de cuatro puntos luego de diseñar y construir las estructuras y el software requeridos. El diseño de los elementos para el ensayo de cuatro puntos en el equipo N.A.T. se basa en los siguientes factores:

- Estudio de las normas y procedimientos del ensayo.
- Implementación de la estructura física.
- Hardware asociado a la captura, acondicionamiento y adquisición de los datos en el equipo N.A.T.
- Software asociado al procesamiento, cálculo y visualización de los datos del ensayo en el equipo N.A.T.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA.

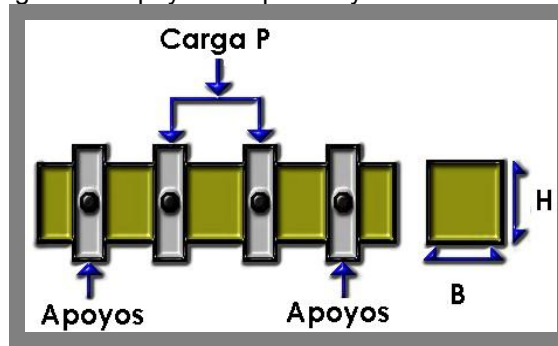
En este ensayo las normas para tener en cuenta en el diseño de la estructura y en la realización del ensayo son la norma europea EN 12697-24 y la norma Americana AASHTO TP8-94.

4.1.1 Objetivo del ensayo. El objetivo al desarrollar este ensayo es determinar la resistencia a la fatiga de las mezclas extraídas de las secciones de capa asfáltica analizada o de muestras hechas en laboratorio. Los ciclos de aplicación de carga sobre la muestra hasta la falla obtenidos por este ensayo son usados para determinar la resistencia a la fatiga de las capas de pavimento asfáltico afectadas con cargas de tráfico real. Con el conocimiento de estos parámetros se puede optimizar el comportamiento de las mezclas asfálticas.

4.1.2 Normatividad del ensayo de fatiga en cuatro puntos en muestra prismática de mezcla asfáltica. El ensayo consta básicamente de un aparato de carga, una cámara ambiental y un sistema de adquisición de datos; el sistema de carga debe tener la capacidad de proveer carga sinusoidal repetida con un rango de 0 a 10 Hz. La muestra debe ir sujeta de tal forma que tenga cuatro puntos de apoyo, los cuales tienen libre translación, libre rotación y mantienen a la muestra en su posición original. La cámara ambiental debe mantener la muestra a una temperatura de 20°C. El sistema de adquisición de datos debe tener la capacidad de medir las deflexiones de la viga y las

cargas aplicadas por el aparato en cada ciclo; además, debe grabar los ciclos de carga y compilar los datos. La muestra se apoya en 4 puntos, recibe la carga en los dos puntos centrales (figura 22) y en los otros dos hay una restricción vertical del movimiento lo que hace que la muestra presente flexión.

Figura 22. Apoyo en 4 puntos y distribución de carga



4.1.3 Procedimiento del ensayo. El ensayo comienza desde la toma de muestras en campo o muestras elaboradas en probetas-molde del laboratorio. Las muestras se montan en la estructura y luego se procede a calibrar el cero de las celdas de carga. Se realiza la lectura de la amplitud de fuerza de la celda a través de la variación de carga dada por el pistón y captada en el LVDT. Posteriormente, se toman lecturas a diferentes periodos de tiempo determinados hasta el momento en que falle la muestra prismática. El punto de falla es aquel en el cual la amplitud de la fuerza sobre la muestra es menor o igual al 50% de la lectura inicial.

4.1.4 Comparación de las normas del ensayo de fatiga en cuatro puntos en muestra prismática de mezcla asfáltica. Con el estudio de las normas europea EN 12697-24 y la norma Americana AASHTO TP8-94, se establecen una serie de diferencias que se deben tener en cuenta para la implementación del ensayo. Esta comparación se hace con el objetivo de establecer los parámetros similares en cada norma y evaluar las diferencias y su relevancia para la realización de la estructura del ensayo.

Luego de la comparación se determina una concordancia en cuanto a rangos de carga, rangos de frecuencia de la aplicación de la carga, acondicionamiento de las muestras y disposición de los sensores y actuadores.

En cuanto a la exigencia de una cámara de temperatura la norma europea (EN) es estricta en su utilización mientras que en la norma americana (AASHTO) este parámetro es opcional, limitando el control de temperatura del ensayo, ya que se debe realizar a 20° . Las normas establecen diferentes dimensiones de las muestras. Por esta razón se diseñan estructuras que cumplan con ambas normas.

4.2. DISEÑO.

Los diseños de las estructuras cumplen con las dos normas la norma europea EN12697-24 y la norma americana AASTHO TP8-94. Los planos definen la estructura diseñada para el ensayo. Para la presentación de los diseños se utiliza software tipo CAD (Computer Assistant Design) como AutoCAD® y SolidEdge®. Los diseños se basan también en estructuras previamente realizadas por empresas y universidades. La figura 23 muestra como en China, la empresa Earth Product fabrica una maquina autónoma que aplica esfuerzos en cuatro puntos de una viga prismática y a la vez da el valor de carga y de deflexión todo por microcontroladores.

Figura 23. Sistema de ensayo 4 puntos.



Herat china

Figura 24. Sistema de ensayo 4 puntos



Cooper research Technology

La figura 24 muestra la estructura para el ensayo de cuatro puntos de la empresa Cooper Research (empresa fabricante del equipo N.A.T. de la universidad Javeriana). En Colombia este ensayo lo ofrece la empresa “Corasfaltos” (figura 25.)

Figura 25. Sistema de ensayo 4 puntos.



Corasfaltos

4.2.1. Diseño de las formaletas. El diseño de la formaleta se basa en la norma europea EN12697-24 y en la norma americana ASSTHO TP8-94. Cada una de estas normas maneja dimensiones que son diferentes entre sí. La norma americana define las siguientes dimensiones:

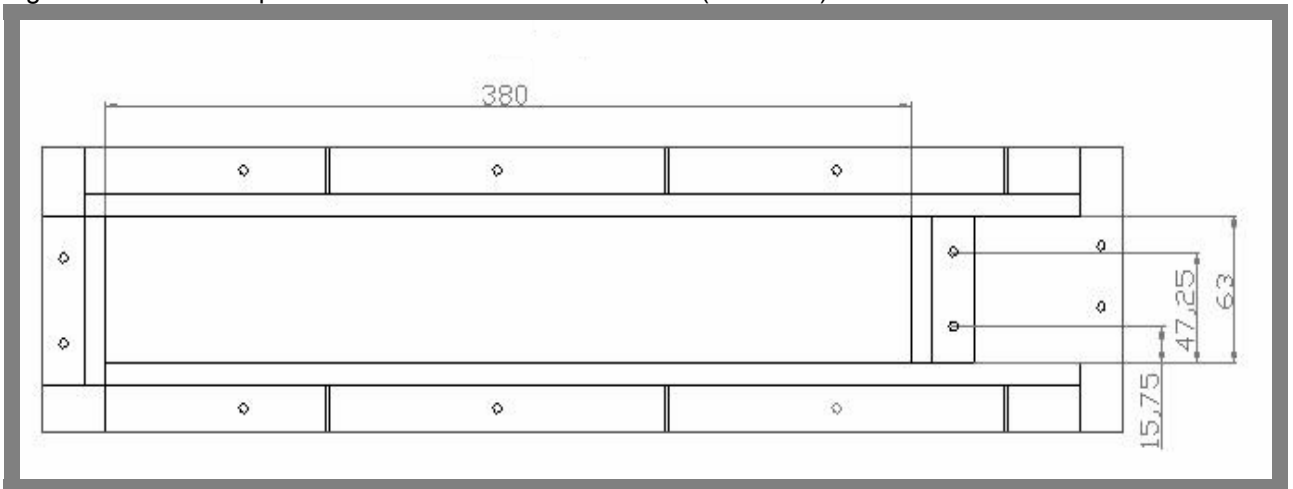
- Longitud 380 ± 6 mm.
- Ancho 63 ± 6 mm.
- Alto 50 ± 6 mm.

La norma europea define las dimensiones con respecto al tamaño máximo de agregado de la mezcla. El ancho y la altura de la muestra debe ser mínimo tres (3) veces el tamaño máximo del agregado. La longitud debe ser ocho (8) veces el ancho y/o el alto. En Colombia las mezclas asfálticas más usadas son la MDC1, MDC2 y la MDC3 cuyo tamaño máximo de agregados es de $\frac{3}{4}$ " (19 mm) para la MDC1. Por lo tanto las dimensiones que cumplen con estos requisitos son:

- Longitud mínima 456 mm.
- Ancho mínimo 57 mm.
- Alto mínimo 57 mm.

Teniendo en cuenta estas dimensiones se realizan los diseños para cumplir con las dimensiones establecidas en las dos normas. Los planos completos de las formaletas se pueden ver el en anexo C

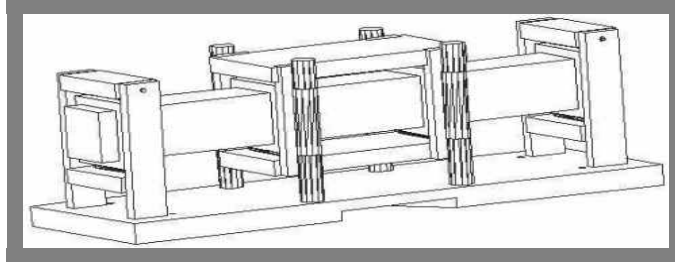
Figura 26. Formaleta para creación de muestras asfálticas (AASHTO)



4.2.2. Diseño de la estructura.

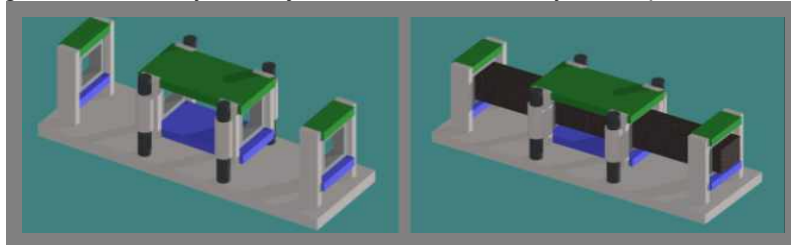
Con ayuda del software CAD se realizan los diseños y se presentan en dos y en tres dimensiones. Los diseños se encuentran en el anexo C.

Figura 27. Estructura del ensayo en 4 puntos implementado (vista 3D)



Una de las ventajas de trabajar con la ayuda de estos programas para diseño es la facilidad, precisión y adecuada presentación de los componentes de la estructura y el modelado directo sobre la pieza en dos y tres dimensiones.

Figura 28. Partes y montaje del sistema de ensayo en 4 puntos



La fabricación de la estructura requiere de un material que cumpla con características para que esta resista las cargas y las deformaciones que se aplican durante el ensayo. El material para la estructura debe cumplir con las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a la tracción (R_m). $> 480 \text{ N/mm}^2$
- Punto de fluencia. $\pm 412 \text{ N/mm}^2$
- Elongación (L) $> 25\%$
- Resistencia al calor excelente.
- Resistencia al agrietamiento excelente.
- Resistencia al impacto excelente.
- Tenacidad excelente.

Después de un análisis de materiales se determinan varios tipos de acero que cumplen con las propiedades mecánicas requeridas. El material más adecuado para la elaboración de la estructura es el Hierro carbono 10/25 que es una aleación Hierro-Carbono con otros elementos de aleación para obtener propiedades específicas.

4.2.3. Requisitos para la construcción de la estructura. Las empresas que fabriquen la estructura deben contar maquinaria de última tecnología, ya que se requiere que las piezas tengan alta precisión. Los equipos como fresadoras y troqueladoras deben estar equipadas con computadores que trabajen con software tipo CAD.

Figura 29. Maquinaria.



4.3. HARDWARE ASOCIADO A LA CAPTURA, ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE LOS DATOS EN EL EQUIPO N.A.T. PARA EL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA.

El hardware asociado a la realización del ensayo de fatiga en cuatro puntos con el que cuenta el equipo N.A.T. es el siguiente:

- **CELDA DE CARGA.** Mide el nivel de esfuerzo aplicado a la probeta durante el ensayo, además controla la deformación y la frecuencia de aplicación de la carga. La celda de carga transfiere los datos de manera análoga en un rango de voltajes de 0 a 3 milivoltios.
- **SISTEMA HIDRÁULICO.** El sistema hidráulico se controla desde un tablero de control. Debe poseer un Actuador neumático con servo válvula neumática que funcione con frecuencias hasta de 100 Hz.
- **SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y MÓDULO DE CONTROL.** Las señales de los transductores se procesan al computador través de la tarjeta de adquisición de datos. El sistema de adquisición y control de datos incluye:
 - Fuentes propias de energía
 - Acondicionamiento de señal para transductor de carga, transductor de desplazamiento y actuador LVDT
 - Unidad de control del procesador de señal digital para adquisición de datos con alta velocidad y control PID de la servo válvula.
 - Controlador de alta velocidad 16bit análogo a digital y 16bit digital a análogo y unidad de entrada/salida digital para el sistema de control del computador.
- **TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO.** La deflexión debe ser medida a través de transductores tipo LVDT.
- **TRANSDUCTORES DE TEMPERATURA.** Los transductores de temperatura son termocuplas tipo K.

Los requisitos que exige la norma para cada control en el equipo N.A.T. se presentan en la tabla 5; El equipo de la universidad cumple con dichos requisitos

Tabla 5. Requisitos mínimos para el ensayo de cuatro puntos.

	Rango	Resolución	Precisión
Control de medida de carga	0 a 5 kN	2 N	5 N
Control de medida de desplazamiento	0 a 5 mm	2 μm	5 μm
Control de medida de frecuencia	5 a 10 Hz	0,005 Hz	0,01 Hz
Control de medida de temperatura		0,25 C°	0,5 C°

4.4. SOFTWARE ASOCIADO AL PROCESAMIENTO, CÁLCULO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS DEL ENSAYO DE FATIGA EN CUATRO PUNTOS EN MUESTRA PRISMÁTICA DE MEZCLA ASFÁLTICA.

Para el manejo de los datos, su procesamiento y la presentación de resultados se realiza un software basado en un lenguaje de programación que sea compatible tanto con el sistema operativo existente como con el hardware con el que trabaja el equipo N.A.T.

Analizadas las necesidades y características dinámicas del sistema, tales como velocidad de respuesta, tiempos de establecimiento y constantes de tiempo, además de sus características estáticas como precisión, exactitud, histéresis, error, etc., se implementa un software realizado en un lenguaje de programación que sea totalmente compatible con el hardware asociado.

4.4.1. Selección del lenguaje de programación. Las características principales que se buscan en el lenguaje de programación son su fácil programación, captura de datos en tiempo real, estabilidad, interfase de usuario amigable y coprocesador matemático además de la compatibilidad con el hardware existente. Después de analizar varios lenguajes de programación como Visual Basic®, C++, Delphi™, entre otros, estos presentan inconvenientes en el momento de adquirir los datos desde la tarjeta, puesto que requieren de controladores especiales. Es por esto que se llega a la conclusión de utilizar como lenguaje de programación principal el dado por la empresa National Instruments llamado LabView® (Laboratorio Virtual) con su versión más reciente LabView 7.0 (2004).

En cuanto a la licencia para la utilización de LabView se generan librerías (.DLL) y un ejecutable (.EXE) de las mismas características de los programas existente en el equipo N.A.T. y de esta manera los gastos en licencia son nulos, solo requiriéndose un pequeño programa llamado "RunTime" de libre distribución y no necesita de mayores requerimientos de Hardware.

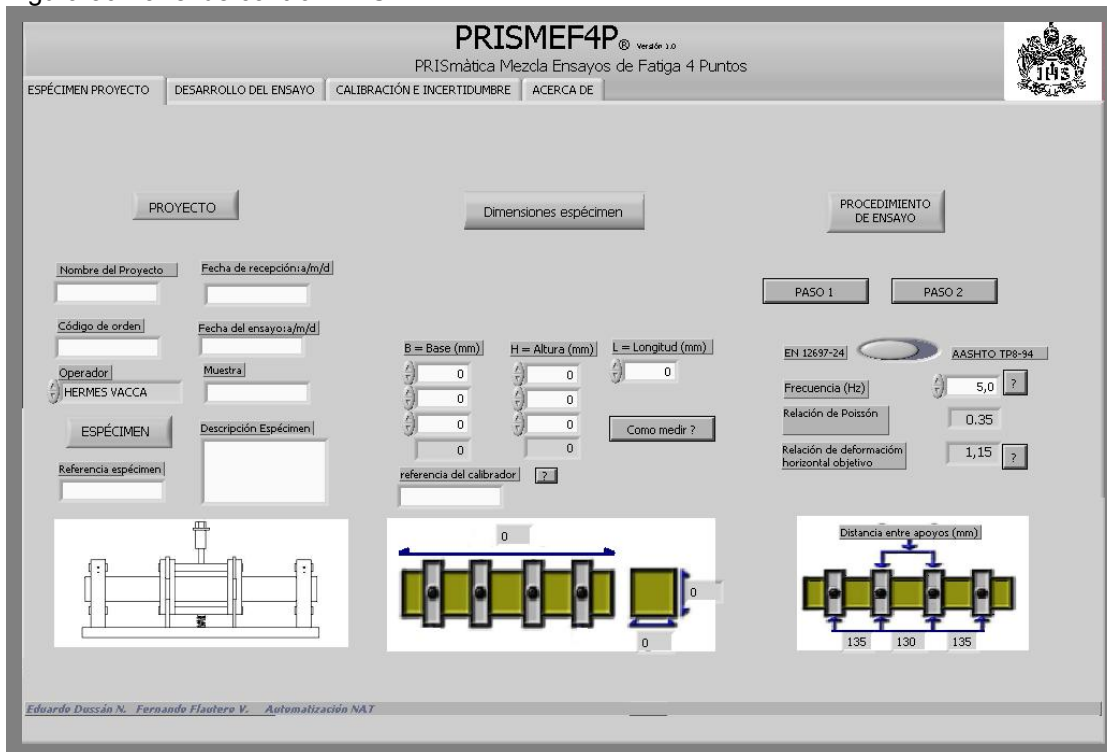
4.4.2. Desarrollo del software PRISMEF4P® Versión 1.0. El software PRISMEF4P (*PRIS*mática *Mez*cla *En*sayos de *Fat*iga de *4* *P*untos) se realiza basándose en el desarrollo de dos tareas fundamentales:

- Mostrar gráficamente la onda con componente sinusoidal que entrega la celda de carga durante el ensayo.
- Presentar en un texto los valores de carga y deformación dados en tiempo real, además de dar la opción de almacenar los datos en archivos de texto para su posterior análisis.

La estructura se compone de dos partes, una parte dirigida al usuario o interfaz que se conoce como panel de control en donde se encuentran los controles y datos, y otra parte que es el código de programación que se realiza en un lenguaje de tipo gráfico llamado lenguaje G de LabView. Este lenguaje utiliza íconos o bloques con diferentes funciones con conectores que simulan el flujo de la información dentro del programa.

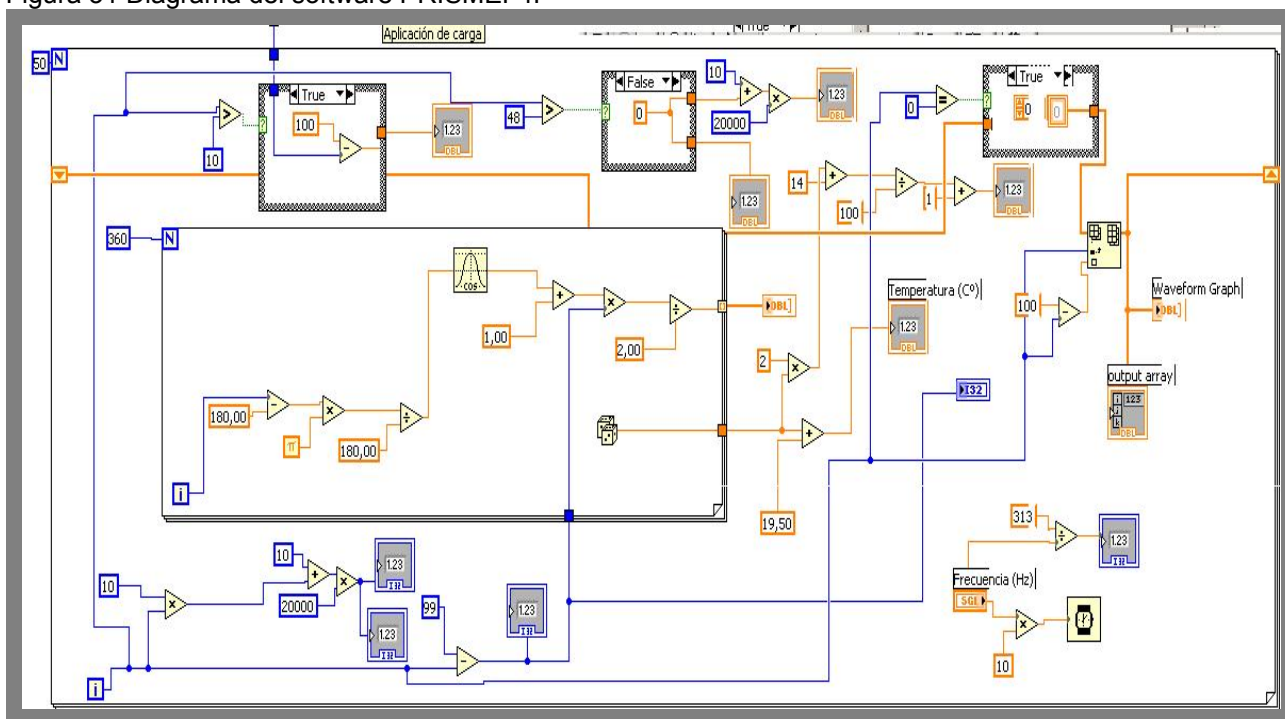
4.4.2.1 Panel de control. La programación se hace interactuando constantemente entre la interfaz y el código gráfico. La figura 30 muestra el panel de control del software.

Figura 30 Panel de control PRISMEF4P



4.4.2.2. Estructura código de programación en lenguaje G. El lenguaje gráfico que maneja LabView muestra de manera clara los procesos y el manejo de los datos. Parte del código en este lenguaje se puede ver en la figura 31. El software cuenta con un manual para su instalación y manejo que se puede consultar en el anexo D.

Figura 31 Diagrama del software PRISMEF4P



4.5. COSTOS

Los siguientes son los costos estimados para las actividades a desarrollar en la implementación del ensayo de cuatro puntos. Estos valores pueden variar dependiendo de la empresa.

Tabla 6. Costos de la estructura

DESCRIPCIÓN	CANT	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Infraestructura del ensayo de cuatro puntos	1	\$ 1.200.000,00	\$ 1.200.000,00
Moldes	2	\$ 250.000,00	\$ 500.000,00
Subtotal Estimado			\$ 1.700.000,00
IVA. (16%)			\$ 272.000,00
Costo Estimado del Proyecto			\$ 1.972.000,00

Fuente: Mecanizados y Troquelados R.C. Bogotá.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

Este proyecto ofrece una mejora en el sistema de control y procesamiento de la información obtenida en los ensayos dinámicos, para ello se pensó en implementar un sistema acorde con los últimos avances en tecnología de adquisición de datos y la automatización de procesos.

Se presentaron alternativas para mejorar los procedimientos existentes en donde un usuario mantenía el control durante todo el ensayo; complementando al usuario con un sistema de hardware y software que realizara y optimizara este control.

Todo el proceso se documentó ampliamente con el fin de dejar memorias de optimización de los ensayos dinámicos y elementos del equipo NAT en los siguientes aspectos:

- Caracterización de los LVDT, celda de carga, termocuplas y posibilidad de implementación de sensores de visión.
- Software para adquisición de datos, calibración y ejecución de los ensayos dinámicos.
- Modelamiento del sistema Motor Eléctrico, Bomba Hidráulica, Pistón
- Modelamiento del sistema N.A.T. en el cual se presenta un buen soporte técnico dado por la empresa National Instrument.
- Introducción a aplicativos en lógica difusa en donde las variables de entrada son la capacidad del equipo y datos de los ensayos dinámicos siguiendo las normas.

El marco de carga del equipo NAT cumple con la capacidad para realizar los ensayos en la actualidad siguiendo la normatividad y también cumple para el ensayo de cuatro puntos.

El sistema hidráulico cumple con la frecuencia de la señal que las normas establecen, pero puede presentar el problema que a mayor frecuencia, la magnitud de la carga disminuye, debido a que no se tiene control de la carrera del pistón por parte de la bomba. Se analizaron cada uno de los elementos y se dieron posibles automatizaciones en donde se sugiere el control del sistema hidráulico.

Para que el equipo trabaje de forma correcta es necesario continuar con el mantenimiento y calibración de los transductores en especial los LVDT, pues se

observa que al no contar con la adecuada sensibilidad y exactitud no se obtienen datos confiables de salida.

Se plantea un desarrollo en lógica difusa para adquirir información sobre los procedimientos llevados a cabo por el usuario de los ensayos dinámicos incluyendo este desarrollo en el software del ensayo y así adquirir confiabilidad en los resultados.

Los ensayos de módulo resiliente de mezclas asfálticas, resistencia a la deformación bajo carga sostenida y resistencia a la deformación bajo carga repetida que se realizan en el equipo NAT de la Pontificia Universidad Javeriana cumplen con los parámetros establecidos en las normas.

El procedimiento del ensayo de fatiga por el método de tensión indirecta lo cumple el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana a excepción de la aplicación de un N_f de 600 y no un N_f de 500 como lo estipula la norma siendo N_f el número de ciclos de acondicionamiento.

En los ensayos dinámicos estudiados, la repetición de las cargas en el mismo punto de aplicación y sus magnitudes constantes son suposiciones que no se dan en la vida real de un pavimento. Con un desarrollo óptimo de los ensayos, los resultados se acercan más a la realidad.

Este trabajo presenta el desarrollo del ensayo de fatiga en cuatro puntos en muestra prismática de mezcla asfáltica para ser implementado en la Pontificia Universidad Javeriana, dicho desarrollo incluye:

- El estudio y la normatividad que rigen el ensayo
- El estudio del hardware asociado para el desarrollo del ensayo.
- Diseño y evaluación de costos de la estructura y las formaletas para el ensayo.
- Desarrollo de software PRISMEF4P.

Con los estudios realizados en este trabajo de grado se concluye que es posible la implementación y puesta en marcha del ensayo de fatiga de muestra prismática de cuatro puntos cumpliendo las normas establecidas, con una inversión a bajo costo al contar con gran parte del equipo necesario e implementando piezas de fabricación nacional de alta calidad.

Este trabajo es un aporte bibliográfico a las escasas fuentes de información sobre la caracterización y manipulación del software y hardware del equipo NAT.

5.2. RECOMENDACIONES.

Un próximo estudio puede estar orientado hacia la incorporación de otras variables como vibración y ruido de la plataforma capturados por los sensores y de las tarjetas de acondicionamiento y adquisición de datos.

Un proyecto de mayor alcance es el de convertir el programa PRISMEF4P en el banco maestro de trabajo del equipo NAT. En el software PRISMEF4P con el lenguaje de programación LabView, se pueden elaborar más herramientas específicas de medición para el equipo NAT optimizadas para adquisición de datos, control de instrumentos, análisis y presentación. De esta forma el programa PRISMEF4P entregará más herramientas para la creación de aplicaciones de ingeniería en medición y automatización con más controles de interfaz de usuario (UI) y soporte para los nuevos dispositivos de adquisición de datos (DAQ).

La falla por fatiga es producto de repeticiones de carga a una frecuencia; la inspección humana para determinar uno de los criterio de falla es muy subjetiva, en donde los sistemas de visión pueden ser usados para realizar estas tareas. Se recomienda la implementación de sistemas de visión basados en computadores por ser más confiables y más efectivos que humanos cuando se trata de tareas repetitivas, de mucho detalle y a altas velocidades como las usadas en el equipo N.A.T.

BIBLIOGRAFÍA

- ASCE. Journal of materials in civil engineering. ASCE. 2004 November December, 2004
- ASTM. Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures, 1995.
- BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. McGraw-Hill.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. Method for the determination of the fatigue characteristics of bituminous mixtures using indirect tensile fatigue. London: BSI, 1997.
- CANO GOMEZ, Luís Fernando. Reevaluemos los pavimentos. Bogotá, 1995.
- ECOPETROL – ICPC, Los Asfaltos Colombianos, Bogotá D.C., 1999.
- EUROPEAN STANDARD. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt Part 23: Stiffness of bituminous mixtures. Brussels: CEN, 2000.
- EUROPEAN STANDARD. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt Part 24: Resistance to fatigue. Brussels: CEN, 2000.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN ICONTEC. Normas 1486, 1075, 1487, 1160, 1308, 1307, 4490. Quinta actualización, 2002-03-11.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Tomo III. Materiales y mezclas asfálticas. Bogotá D.C., 1998.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Normas de ensayos de materiales para carreteras. Bogotá D.C., 1998.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Bogotá: INV., 1996.
- NATIONAL INSTRUMENTS, LABVIEW INC. Manual del usuario. LabView versión 7.0.
- PALLAS ARENY, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. 3ª Edición. Alfa omega Marcombo. 2001.

- PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. LIDIC 2, Caracterización de mezclas bituminosas drenantes utilizando asfaltos modificados con agregados de la sabana de Bogota aplicando tecnología N.A.T. (Nottingham Asphalt Tester) octubre 1999.
- QUIMBAYO BARROS, Ricardo. Sistema de adquisición de datos para el ensayo de fatiga. Proyecto de grado Universidad de los Andes. 2000.
- REYES LIZCANO, Freddy Alberto. Diseño racional de pavimentos, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.
- UNIVERSITY OF NOTTINGHAM. Residential Course on Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation. Nottingham, 1996.
- WILLIAMS, Arthur B. Amplificadores operacionales: teoría y sus aplicaciones México. Bogotá McGraw-Hill/Interamericana de México, 1988.
- XI SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS. Corasfaltos, ECOPETROL, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1995.

BIBLIOGRAFIA ELECTRÓNICA.

- AMIDATA S.A.: Madrid, España.2004.Disponible en <http://www.amidata.es>
- CONTROLS S.r.L. Italia 2004. Disponible en URL. <http://www.controls.it/english/>
- COOPER, research technology. Rein Unido, 2004. Disponible en URL: <http://www.cooper.co.uk/es/pdf/4ptspec.pdf>, www.cooper.co.uk
- CR, Magnetics inc. Estados Unidos 2003. Disponible en <http://www.crmagnetics.com>
- ELECTRONICS and Electrical Engineering Laboratory. Inglaterra 2004. Disponible en <http://www.eeel.nist.gov>
- EQUIPAMIENTO tecnológico Tecno EduC.A.T.ional. Córdoba, Argentina 2004. Disponible en <http://www.tecnoedu.com/Pasco/CI6526.php>
- GEOPHYSICAL Instrument Supply Co. Estados Unidos 2004. Disponible en <http://www.giscogeo.com>
- GMW. Associates. California, Estados Unidos. 2003. Disponible en <http://www.gmw.com>
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Colombia 2004. Disponible en : www.invias.gov.co/info/red_vial/red_vial.asp
- INSTRU, Instrumentos de medición, 2004. Disponible en http://www.e-instru.com/C.A.T.1_1.htm
- KEITHLEY Headquarters. Ohio, Estados Unidos. 2004. Disponible en <http://www.keithley.com>
- KOBOLD, Messing. Inglaterra 2004. Disponible en http://www.koboldmessring.com/spanish/pdf/t2es_ttd.pdf
- NOTTINGHAM Centre for Pavement Engineering. Reino Unido. Diciembre 2003. Disponible en <http://www.nottingham.ac.uk/~evzncpe/frameindex.htm>

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.

- AUTORES.
DUSSAN NAVARRO EDUARDO.
FLAUTERO VALENCIA FERNANDO.
- TÍTULO Y SUBTÍTULO
AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYOS DINÁMICOS DEL LABORATORIO DE PAVIMENTOS EN EL EQUIPO N.A.T. (NOTTINGHAM ASPHALT TESTER) DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- CIUDAD BOGOTA D.C. AÑO DE ELABORACIÓN 2005.
- NÚMERO DE PÁGINAS 52.
- TIPO DE ILUSTRACIONES FIGURAS, TABLAS, FOTOGRAFÍAS, PANTALLAS DE SOFTWARE.
- MATERIAL ANEXO DOCUMENTOS, PLANOS DIGITALES, SOFTWARE.
- FACULTAD INGENIERÍA PROGRAMA CIVIL.
- TÍTULO OBTENIDO INGENIERO CIVIL.
- MENCIÓN.
- DESCRIPTORES PAVIMENTOS FLEXIBLES, ASFALTOS, ENSAYOS ASFALTOS.