

Diseño, construcción e instrumentación del equipo de ahuellamiento para pavimentos flexibles

Design, building and instrumentation of the rutting equipment for flexible pavements

Pahola Porras Rodríguez¹, Andrés Felipe Tovar Rivera², Oscar Javier Reyes-Ortiz³

¹Ingeniera en Mecatrónica, Asistente de Investigación, Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación Geotecnia, Bogotá D.C. - Colombia

²Ingeniero en Mecatrónica, Asistente de Investigación, Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación Geotecnia, Bogotá D.C. - Colombia

³Ph.D en Ingeniería, Profesor Titular, Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación Geotecnia, Bogotá D.C. - Colombia
Email: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

Recibido 10/03/2016
Aceptado 04/03/2017

Cite this article as: P. Porras, A. Tovar, O. Reyes-Ortiz, "Design, building and instrumentation of the rutting equipment for flexible pavements", Prospectiva, Vol 15, N° 2, 126-134, 2017.

RESUMEN

El objetivo principal de la investigación fue diseñar, construir e instrumentar un equipo de pavimentos que determina las deformaciones permanentes en pavimentos flexibles con un sistema neumático que transfiere cargas a las probetas. El desarrollo del equipo inició con un proceso de automatización consistente en realizar una interfaz de usuario-máquina en la cual se definen variables como: la presión, humedad, temperatura y número de ciclos por minuto, para después realizar la adquisición de datos en tiempo real por medio de un microcontrolador 18F4550 con transmisión USB. Durante el ensayo que dura aproximadamente 2 horas se realiza el control de temperatura por medio de cuatro termocuplas tipo J que están distribuidas en la cámara de la máquina. Así mismo, se controla la presión de los actuadores neumáticos y la velocidad del ensayo por medio de un variador. Este tipo de controladores son PID discretos implementados en el microcontrolador y el variador respectivamente.

Como logro obtenido de la investigación, se diseñó, construyó e instrumentó una máquina con capacidad de evaluar el comportamiento de deformaciones permanentes del pavimento bajo condiciones controladas de temperatura por medio de resistencias y de termocuplas y cargas admisibles por actuadores neumáticos. Este sistema se desarrolló de tal manera que el usuario final indicará únicamente las condiciones iniciales y la prueba se desarrollará de manera autónoma. Finalmente, se construyó un equipo versátil para la ejecución de ensayos en pavimentos que representen la deformación bajo las condiciones reales de carga, temperatura, radiación UV y humedad, variables a las cuales está sometida una estructura de pavimento.

Palabras clave: Ahuellamiento; Pavimento flexible; Radiación UV, Sistema neumático.

ABSTRACT

The main objective of the research was to design, construct and instrument a pavement equipment who determines the permanent deformations in flexible pavements with a pneumatic system that transfers loads to the samples. The development of equipment started with an automation process consisting of a user-machine interface in which variables such as pressure, humidity, temperature and number of cycles per minute are defined, for later perform a real-time data acquisition using a 18F4550 microcontroller with USB transmission. Test duration is approximately 2 hours, during which temperature control is performed

by means of four J type thermocouples that are distributed in the chamber of the machine. In addition, the pressure of the pneumatic actuators and the speed of the test are controlled with a variable speed drive. These types of controllers are discrete PID implemented in the microcontroller and the speed drive.

As a result of the research, a machine was designed, constructed and implemented with the capacity to evaluate the behavior of the pavement permanent deformations under controlled conditions of temperature and admissible loads, the first using resistors and thermocouples, the other by means of pneumatic actuators. The system was developed in such a way that the final user will indicate only the initial conditions and the test will be developed autonomously. Finally, a versatile equipment was built for the execution of tests on pavements that represents the deformation under the real conditions of load, temperature, UV radiation and humidity, variables to which a pavement structure is subjected

Key words: Rutting; Flexible pavement; UV irradiation; Pneumatic system.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales daños de las estructuras de pavimentos ante condiciones de carga y clima es la deformación permanente, cuya manifestación son ondulaciones en la vía, que pueden generar accidentes y dañar el pavimento aceleradamente. Por tal motivo, es importante poder generar el fenómeno en el laboratorio, de tal manera, que se pueda reducir al mínimo el efecto en la obra a escala real [1].

Con base en esta problemática se realizó una investigación de los equipos existentes que han sido desarrollados en el mundo y las variables estudiadas en el fenómeno de la deformación permanente. Entre los equipos más utilizados se encuentra el equipo desarrollado en Georgia Loaded WheelTester (GLWT), el cual simula cargas de 445N por medio de una rueda que es presurizada por una manguera. Para generar la condición más desfavorable que sufre un pavimento y controlar la temperatura del ensayo, la probeta es sumergida en agua que varía entre 40 y 50°C y el tiempo de duración del ensayo es de 120 minutos [2]. Otro equipo existente en los laboratorios de pavimentos es el Asphalt Pavement Analyzer (APA), capaz de evaluar la deformación permanente, la fatiga y la resistencia a la humedad. Esta máquina se diseñó a partir de una modificación de la máquina de Georgia GLWT [3]. Otra modificación del equipo GLWT es el Hamburg Wheel-Tracking Device (HWT), desarrollado en Hamburgo y que permite realizar ensayos en tiempo real en dos probetas por medio de dos ruedas con un movimiento oscilatorio [4]. Así mismo, el laboratorio de la Universidad de Purdue, creó el Wheel-Tracking Device que puede determinar el ahuecamiento potencial y la sensibilidad a la acción de humedad [5]. En Francia, se construyó el French Pavement Rutting Tester que permite determinar la sensibilidad al ahuecamiento en mezclas asfálticas en caliente con un

movimiento de vaivén, controlando la presión y otras variables por medio de un panel [6].

Por último, la Model Mobile Load Simulator (MMLS3), desarrollado en Sudáfrica, simula ensayos a escala 1/3 [7].

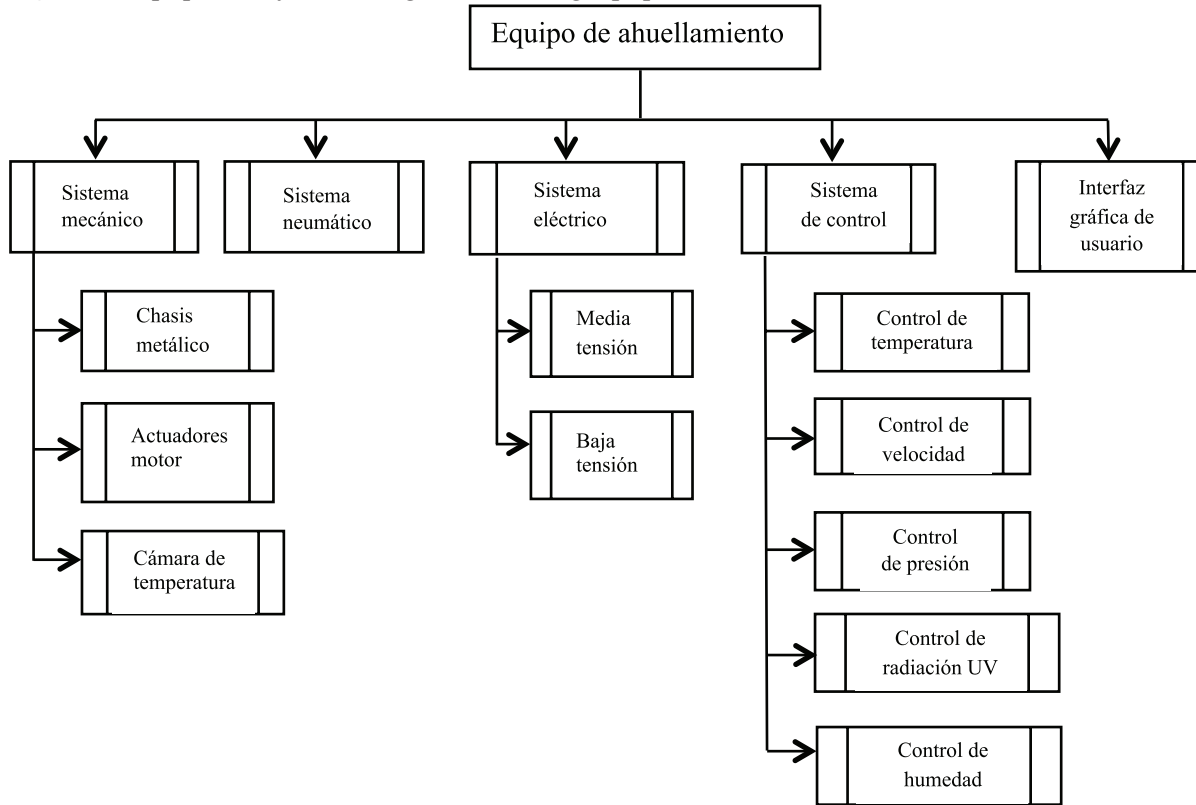
Como resultado del estudio bibliográfico de los equipos existentes para determinar la deformación permanente en pavimentos, mostró que las principales variables de estudio son: temperatura, pasadas por minutos y presión [8]. Tomando en cuenta los equipos tanto construidos por laboratorios como los comercializados por las empresas, se desarrolló una investigación concentrada en diseñar, construir e instrumentar un equipo para pavimentos cuyas características representan las variables a las cuales es sometido un pavimento flexible como: temperatura, carga, humedad, radiación UV entre otras condiciones medioambientales. Así mismo crear una interface entre el usuario y el equipo para monitorear y controlar las variables del ensayo en tiempo real.

2. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para el diseño, construcción e instrumentación del equipo, consistió en 5 etapas principales. La primera fase correspondió al diseño mecánico de la estructura, la segunda fase fue el diseño neumático de la transmisión de cargas y adicionalmente se desarrolló los moldes para las distintas formas de las muestras de pavimentos que pueden ser analizadas. La tercera fase fue el sistema eléctrico de media y baja tensión. La cuarta etapa fue el sistema de control de temperatura, velocidad, presión, radiación UV y humedad. La última fase fue la interfaz gráfica de usuario la cual fue diseñada en LabView®. Para el desarrollo de los mecanismos utilizados para esta máquina se realizaron los siguientes sistemas, como se observa en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de sistemas del equipo de ahuellamiento.

Figure 1. Equipment systems diagram of rutting equipment.



Fuente: autores

2.1 DISEÑO MECÁNICO

Los materiales para la estructura del ahuellador consisten principalmente en:

2.1.1 Chasis metálico

Se desarrolló una estructura con perfil CR calibre 16,4 cm por 4 cm y recubierta con pintura electrostática, diseñada en el 2005 pero se reforzó y modificó en el desarrollo de la automatización para soportar las vibraciones del motor y el peso de los elementos como la excéntrica, cámara de temperatura y otros elementos.

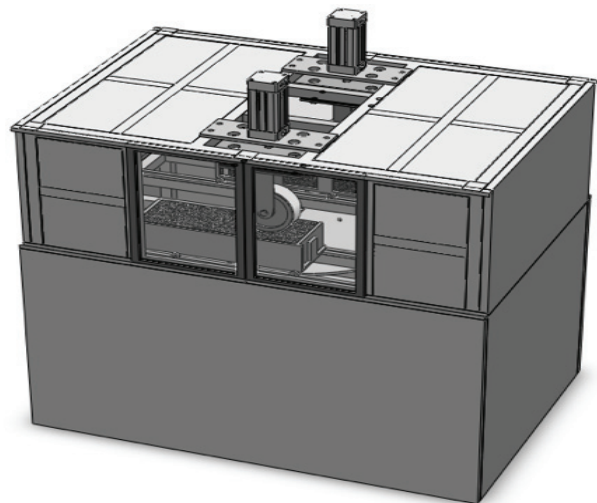
2.1.2 Sistema de acople motor

Para la transmisión de movimiento se diseñó un sistema que realiza un movimiento rotacional generado por un motor trifásico Nord de 1,5 kW y por medio de un acople flexible tipo araña al eje del motor, este mismo es conectado a una excéntrica de 655 mm de diámetro que transforma el movimiento lineal por medio del acople flexible a las prensas donde se colocará las diferentes muestras de 300 mm por 50 mm por 50 mm. Las prensas están unidas a la excéntrica por medio de rodamientos de cojinetes de bolas, los cuales a su vez están apoyados en otros puntos permitiendo que se deslicen sobre las guías creando así un movimiento

lineal. En la figura 2 se puede observar la estructura metálica y los cilindros acoplados con un par de ruedas de caucho.

Figura 2. Diseño estructura del equipo.

Figure 2. Equipment structure design.



Fuente: autores

2.1.3 Cámara de temperatura

En la parte superior del chasis se colocan la cámara de temperatura y las muestras, además esta revestida

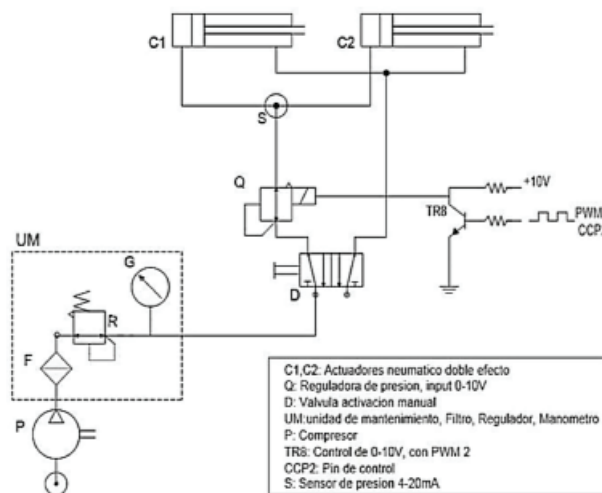
por fibra de vidrio, que permite un mejor aislamiento por sus propiedades térmicas [9], permitiendo conservar el calor interior de la cámara hasta 70°C. De igual manera, se instalaron en la platina superior con revestimiento de asbesto, dos resistencias de 1800W a 220V conectadas en serie para reducir el consumo de corriente a 7,5A, la temperatura al interior de la cámara es monitoreada a través de 4 termocuplas Tipo J a la misma altura de las muestras asfálticas. Estas resistencias anteriormente descritas se activan y desactivan por medio de un relé de estado sólido.

2.2 DISEÑO NEUMÁTICO

El sistema neumático descrito en la figura 3 está conformado por dos cilindros neumáticos con una presión máxima de 16 bares, un émbolo de 80 mm de diámetro y un recorrido de 100 mm, una válvula reguladora de presión de 0-145 PSI con una entrada de 0-10V directamente proporcional, una unidad de mantenimiento, un filtro, un regulador, y un sensor de presión el cual permite realizar un control de presión al sistema de forma automatizada.

Figura 3. Sistema neumático.

Figure 3. Pneumatic system.



Fuente: autores

Las características del ensayo requieren ejercer diferentes cargas a las muestras asfálticas, debido a esto se diseñó un sistema neumático, con un componente manual que es una válvula reguladora de presión de 5 vías con una variación de presión 0,6 Mpa y 1,2MPa.

2.3 DISEÑO ELÉCTRICO

Para el manejo del flujo de corriente eléctrica, se dividieron las actividades en media y baja tensión, como se muestra a continuación:

2.3.1 Media tensión

Se desarrolló un circuito para el manejo de la red trifásica, compuesto por un totalizador Legrand de 40 amperios, un contacto de retención, el cual se encarga de energizar el variador de velocidad, una fuente DC de 24 voltios que alimenta el circuito de acondicionamiento y control de la máquina, un relé de estado sólido que activa las resistencias dentro de la cámara de temperatura, como se muestra en la figura 4.

2.3.2 Baja tensión

Para este diseño se desarrollaron circuitos que permitieran el manejo de la automatización y la adquisición de datos de los sensores. Los circuitos desarrollados fueron:

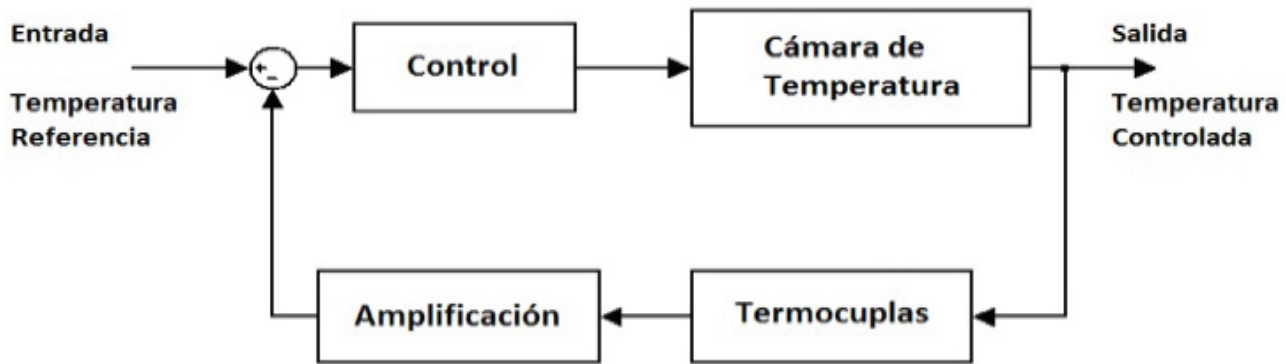
- **Circuito de control:** este circuito cuenta con un PIC18F4550, el cual se comunica con el PC por medio de RS232, también se conecta una LCD, el PIC genera 2 señales del PWM, una para el variador de velocidad y la otra para la válvula reguladora de presión del sistema neumático, además de generar las señales para los actuadores y los relés.
- **Circuito de acondicionamiento:** para las señales de los sensores de mV a V, se realizó una etapa de amplificación y acondicionamiento. Se utilizaron amplificadores de instrumentación como: AD626 y LM324. Además de filtros pasa bajos para disminuir las perturbaciones en la señal.
- **Circuito de potencia:** teniendo en cuenta que algunos elementos como los relés necesitan entradas de 10, 12 o 24V, se realizó una configuración de transistores para garantizar el voltaje necesario de 110V.

Figura 4. Sistema eléctrico.

Figure 4. Electric system.



Fuente: autores

Figura 5. Diagrama de control de temperatura.**Figure 5.** Temperature control diagram.

Fuente: autores

2.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Para el tipo de ensayos que se requieren en un equipo de deformación permanente se realizaron varios controles:

2.4.1 Control de temperatura

Para controlar la temperatura de la cámara se usó como actuadores 2 relés de estado sólido para activar las resistencias de 1800W y como sensores se utilizaron 4 termocuplas Tipo J, la amplificación de la señal se realizó por medio de circuitos análogos como LM324 y finalmente el control se implementó en un microcontrolador PIC 18F4550 como anteriormente se describió. Como bucle de control se tiene el diagrama de la figura 5.

Para controlar la temperatura de acuerdo a los parámetros del ensayo se tomaron los datos de entrada y salida de la planta, estos datos fueron cargados en el módulo Ident de Matlab [10] y fue aproximado el comportamiento a una función de transferencia de primer orden, pero debido a que el actuador funciona como un dispositivo ON/OFF, se decidió hacer un control ON/OFF [11] con una histéresis de $\pm 3^\circ\text{C}$. La función de transferencia de primer orden fue (1):

$$G(s) = \frac{2.3905}{9995.8s + 1} \quad (1)$$

2.4.2 Control de velocidad

Para garantizar el número de pasadas por minuto que hacen las prensas al moverse con un PWM dado al variador, se planteó implementar un sistema de control, que actuará durante el desarrollo del ensayo o proceso de ahuellamiento en mezclas asfálticas. Del análisis se obtuvo una función de transferencia aproximada de esta planta, se tomaron datos de la entrada y la salida,

se cargaron en Ident de Matlab y se aproximó la solución a una función de segundo orden.

De otra parte, se diseñó un controlador PI digital [12] el cual estará actuando sobre el variador de velocidad, cambiando la señal del PWM, asignado a este. La realimentación del sistema se obtendrá con la cantidad de pasadas por minuto que son captadas por medio del sensor efecto hall y cuyas constantes del controlador fueron calculadas por el método en lazo abierto de Ziegler-Nichols [13], obteniendo la función de transferencia (2):

$$G(s) = \frac{0.077182}{20670s^2 + 287.54s + 1} \quad (2)$$

2.4.3 Control de presión

El control de presión se diseñó para regular la carga que tendrá el actuador en el sistema neumático y por ende, la muestra de pavimento a ensayar. El sistema fue identificado con la herramienta de Ident de Matlab y se obtuvo una función de transferencia de segundo orden, su respuesta a una entrada escalón garantiza que sea estable y por tal motivo, se diseñó un controlador PI digital, el cual varía el valor de la señal PWM asignado para cambiar el voltaje de entrada a la válvula reguladora de presión, esta variación es capturada por el sensor de presión NOSHOK de 0 a 100 PSI con una salida de 4-20mA. El proceso descrito anteriormente y que entrega señal a la entrada de los cilindros neumáticos con sensores tipo strain gauge, recorrido de 26 mm y una salida de 0-62mA, permiten medir la deformación de la muestra y cierra el lazo de control. Finalmente, las constantes del controlador fueron calculadas por el método en lazo abierto de Ziegler-Nichols, obteniendo la función de transferencia del sistema (3):

$$G(s) = \frac{0.0039321}{0.65611s + 1} \quad (3)$$

2.4.4 Control de radiación UV

Para controlar la radiación UV-A, se utilizaron 4 lámparas de 300 mm y se realizó un control ON/OFF por medio de relés de estado sólido, tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Lámparas UV.
Figure 6. UV light bulb.



Fuente: autores

2.4.5 Control de humedad

Para el control de humedad se utilizó un MT-530 Súper, el cual hace un control PID temporizado.

Figura 7. Control de humedad.
Figure 7. Humidity control.



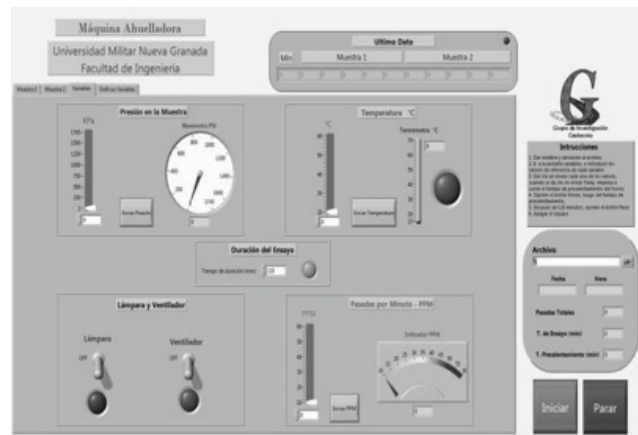
Fuente: autores

2.5 Interfaz gráfica de usuario

Para realizar el proceso de automatización y ejecución del ensayo, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario en LabView® [14] para controlar y visualizar el proceso del ensayo de ahuellamiento de una manera sencilla y en tiempo real [15]. La interfaz desarrollada (figura 8) [16] es una aplicación que monitorea las variables de control y las señales de los sensores, además durante el ensayo se tiene la capacidad de modificar los parámetros de referencia de presión, temperatura,

pasadas por minuto y tiempo de duración [17]. Una vez se definen los parámetros iniciales (temperatura, presión etc.), se despliega un cuadro de dialogo en donde se solicita definir el nombre y ubicación para guardar el archivo que recopila la información del ensayo [18]. Acto seguido, se inicia el proceso de precalentamiento de las muestras y la graduación de la temperatura del ensayo por un periodo de 2 horas, tal como lo establecen las normas de ensayo.

Figura 8. Interfaz gráfica de usuario.
Figure 8. Graphic user interface.



Fuente: autores

La interfaz se divide en cuatro paneles principales, en los paneles uno y dos se monitorea la deformación de las muestras 1 y 2 respectivamente con respecto al tiempo. El tercer panel establece y visualiza los parámetros de presión en el sistema neumático, la temperatura de la cámara, el número de pasadas por minuto, los interruptores del ventilador y lámpara de la cámara y el tiempo del ensayo [19]. En el cuarto panel se determina la configuración del puerto COM, que conecta el cable RS232, que a su vez está conectado al microcontrolador, que grafica las variables de temperatura, pasadas por minuto y presión con respecto al tiempo. Finalmente, este último panel visualiza la finalización del tiempo de precalentamiento y ejecución del ensayo [20].

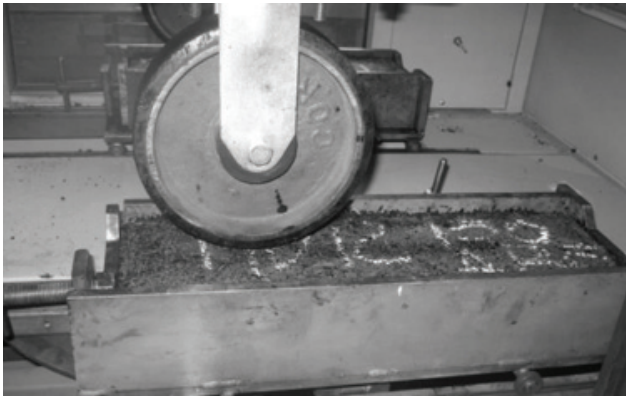
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez diseñado, construido e instrumentado el equipo de ahuellamiento para pavimentos flexibles, se realizaron pruebas con múltiples probetas, las cuales fueron sometidas a diferentes cargas (600kPa -650kPa), temperaturas (40°C-70°C), radiación UV a 325 μm y humedad (20 a 90%). Es importante resaltar, que se realizó el proceso de preacondicionamiento de las muestras, consistente en calentar la cámara de temperatura durante 2 horas y realizar el ensayo en las si-

guientes 2 horas. En la figura 9, se observa la muestra ensamblada en la máquina.

Figura 9. Ensayo de ahuellamiento con cargas entre 600-650kPa.

Figure 9. Rutting test loads between 600 up to 650kPa.



Fuente: autores

Durante la ejecución de los ensayos se adquirieron los datos de las variables a estudiar, como se muestra en la figura 10. De los resultados se observa la deforma-

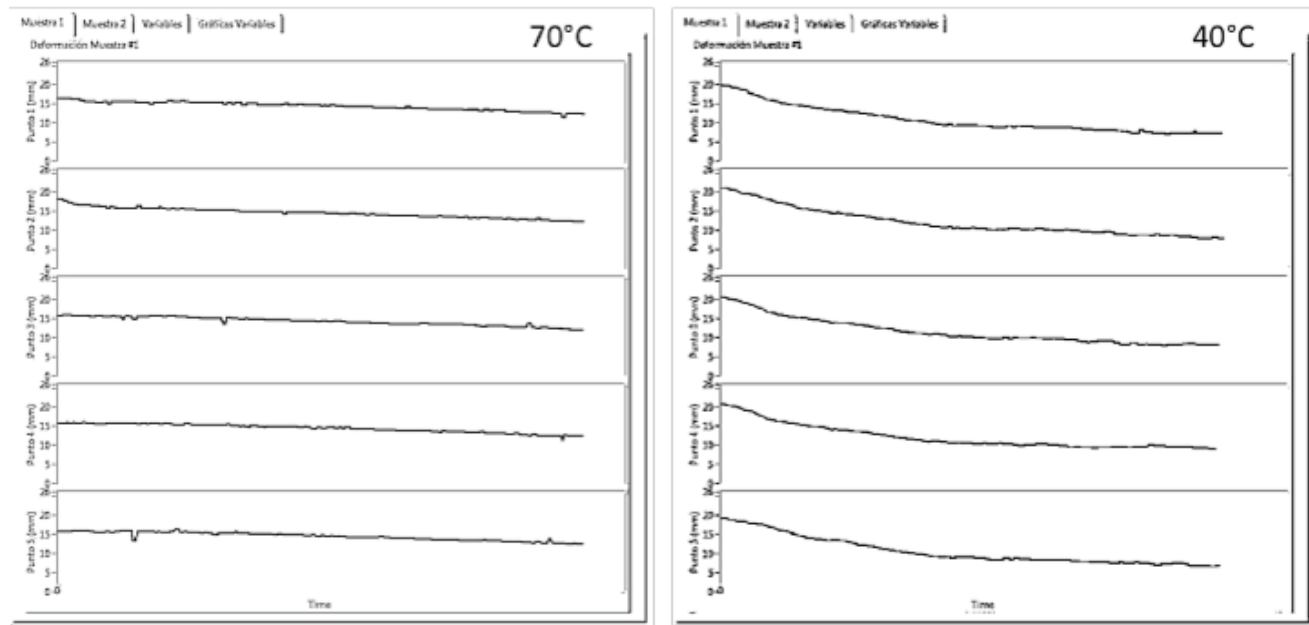
ción plástica del pavimento flexible respecto al tiempo y la temperatura (las primeras pruebas se desarrollaron bajo temperatura de 40°C y las segundas pruebas a 70°C). Dentro de las pruebas desarrolladas, se identificaron pequeños fragmentos de roca de la granulometría de las muestras ensayadas, las cuales causan las irregularidades presentadas en las gráficas y establecen la sensibilidad de los sensores y el buen funcionamiento del equipo, irrelevantemente se generen cambios leves en la deformación.

4. CONCLUSIONES

Con base en un estudio nacional e internacional de los equipos existentes de deformación plástica para pavimentos flexibles, se diseñó y construyó un equipo cuyo principal aporte es brindar la ejecución de ensayos bajo especificaciones de normas técnicas nacionales e internacionales, que a su vez permitan controlar no solo la temperatura, presión y frecuencia, sino la humedad relativa y radiación solar, variables que afectan significativamente el deterioro del pavimento y no las tienen los equipos existentes. Así mismo, dicho equipo brindará la posibilidad de adelantar nuevas investigaciones al interior de la universidad, aportan-

Figura 10. Visualización de los datos en la interfaz gráfica de usuario.

Figure 10. Dates in the Graphic interface user.



Fuente: autores

do al conocimiento del daño por humedad y radiación solar de pavimentos flexibles.

De otra parte, se desarrolló un sistema de aplicación de carga por medio de cilindros neumáticos accionados por medio de una válvula proporcional que permiten generar una presión constante sobre las muestras durante el ensayo, siendo novedoso y obteniendo mayor precisión de la deformación de las muestras, según ensayos ejecutados. Así mismo, el sistema de deformación desarrollado no solo establece la deformación de muestra en la parte central, sino, en diferentes partes y en tiempo real, característica que no presenta los otros equipos existentes y son objeto de investigación y análisis. Finalmente, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario, la cual permite visualizar en tiempo real la deformación permanente en las muestras y control sobre las variables del ensayo. Por último, se observó la influencia de la temperatura, radiación UV y humedad en las muestras del pavimento flexible, encontrándose mayor deformación a mayor temperatura (deformaciones superiores al 15% al incrementar entre 5 y 10°C la muestra), mayor rigidez de la muestra en la medida que la radiación solar se incrementa (incremento de la resistencia entre 8 y 14% al incrementar la radiación solar en un 25%) y mayor deterioro de la mezcla asfáltica (17 y 23%) al tener humedades relativas iguales o superiores al 85%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada en especial a la Vicerrectoría de Investigaciones por el apoyo económico a través del proyecto IMP-ING-2132.

REFERENCIAS

- [1] T. Liu, G. W. Hu, C. Gu, "Research of Rigid Pavement on Structure Combination of HMA Overlays", *Journal Applied Mechanics and Materials*, 477-478, 765-769, 2014.
- [2] J. N. Wang, "Performance Assessment of Asphalt Mixtures Using Frequency Sweep Test at Constant Height and Hamburg Wheel-Tracking Device", *Journal Advanced Materials Research*, 723, 444-451, 2013.
- [3] J. Rushing, D. Little, N. Garg, "Asphalt Pavement Analyzer Used to Assess Rutting Susceptibility of Hot-Mix Asphalt Designed for High Tire Pressure Aircraft", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2296, 97-105, 2012.
- [4] I. Sel, Y. Yildirim, H. B. Ozhan, "Effect of Test Temperature on Hamburg Wheel-Tracking Device Testing", *Journal Materials in Civil Engineering*, 26(8), 04014037, 2014.
- [5] F. Morea, R. Zerbino, "Wheel tracking test (WTT) conducted under different standards. Study and correlation of test parameters and limits", *Journal Materials Structural Engineering*, 48(12), 4019-4028, 2015.
- [6] H. Wu, B. Huang, X. Shu, "Characterizing Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures Utilizing Loaded Wheel Tester", *Journal Materials in Civil Engineering*, 26(1), 152-159, 2014.
- [7] F. Hugo, I. Boweker, J. Liebenberg, D. Rossman, (2011, September), "Evaluation of Performance of Asphalt Paving Mixes under Harsh Conditions using the MMLS3". In 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Africa.
- [8] F. Reyes Lizcano and O. J. Reyes Ortiz, "Ahuellamiento en mezclas asfálticas por la adición de residuos de plástico como reemplazo de material", *Revista Ingeniería*, 14 (1-2), 123-133, 2004.
- [9] G. Liu, E. Nielsen, J. Komacka, G. Leegwater, M. van de Ven, "Influence of soft bitumens on the chemical and rheological properties of reclaimed polymer-modified binders from the "old" surface-layer asphalt", *Journal Construction and Building Materials*, 79, 129-135, 2015.
- [10] J. Cao, Q. Ye, P. Li, "Resistance Furnace Temperature Control System Based on OPC and MATLAB", *Journal Measurement and Control*, 48(2), 60-64, 2015.
- [11] Ogata, S. Dormido Canto, R. Dormido Canto and S. Dormido Bencomo, *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Prentice Hall, 2003.
- [12] M. A. Rahimian, M. S. Tavazoei, "Improving integral square error performance with implementable fractional-order PI controllers", *Journal Optimal Control Applications and Methods*, 35(3), 303-323, 2014.
- [13] S. N. N. Ramrao, M. Singh, "PID Controller Auto Tuning using ASBO Technique", *JCET*, 4(3), 192-204, 2014.
- [14] P. Vikhe, N. Punjabi, C. Kadu, "Real Time DC Motor Speed Control using PID Controller in LabVIEW", *IJAREEIE*, 3(9), 12162-12167, 2014.
- [15] C. Muresan, E. Dulf, R. Both, "Vector-based tuning and experimental validation of fractional-order PI/PD controllers", *Nonlinear Dynamics*, 84(1), 179-188, 2015.
- [16] K. Zhou, J. He, Q. Tan, "Fuzzy-PID Control Application in Temperature Automation Control System of Tunnel Kiln", *AMM*, 442, 466-471, 2013.

- [17] F. Alarçin, H. Demirel, M. Ertugrul, A. Yurtseven, "Conventional PID and Modified PID Controller Design for Roll Fin Electro-Hydraulic Actuator", *Acta Polytechnica Hungarica*, 11(3), 233-248, 2014.
- [18] T. Caldognetto, S. Buso, P. Mattavelli, "Digital Controller Development Methodology Based on Real-Time Simulations with LabVIEW FPGAc Hardware-Software Toolset", *ELS*, 17(2), 110-117, 2013.
- [19] G. Kahe, A. Jahangir, B. Ebrahimi, "A compensated PID active queue management controller using an improved queue dynamic model", *International Journal Communication Systems*, 27(12), 4543-4563, 2013.
- [20] M. Heidari, H. Homaei, "Improving the pneumatic control valve performance using a PID controller", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38, 240-247, 2014.