

MEDICIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE LOS CAMINOS DE GRAVA CON TECNOLOGÍA DE SENSORES DE ACELERACIÓN

J. PIRINEN & K. PULKKINEN

Administración Finlandesa de Carreteras, Finlandia

jarkko.pirinen@ely-keskus.fi

J. SEPPÄ & R. HEIKKILÄ

Laboratorio de Ingeniería Estructural y Tecnología de la Construcción, Universidad de Oulu, Finlandia

rauno.heikkila@oulu.fi

A. LAMPINEN

AL-Engineering Oy, Finlandia

AL.Engineering@al-engineering.fi

J. JOKIKAARTO & M. PIKKARAINEN

Tietomekka Oy, Finlandia

jarmo.jokikaarto@tietomekka.fi

RESUMEN

Finlandia cuenta con una red total de carreteras públicas de 78.000 Km. de los cuales el 35% son caminos de grava. Por lo general estos caminos de grava corresponden a la red de carreteras de bajo volumen, prestando unos servicios de calidad estándar.

El objetivo de este proyecto consiste en desarrollar un método de medición automática de la uniformidad de los caminos de grava. Dicho método contempla el uso de un vehículo equipado con un instrumento de medición y una unidad almacenadora de datos provista de un dispositivo de transferencia los datos. El instrumento de medición instalado en el automóvil consta de un sensor de aceleración vertical y de una unidad terminal con un módulo de recolección de datos.

El método usado para medir la regularidad del camino de grava se elaboró recurriéndose a la definición de una interfaz entre el software de aplicación y la unidad de medición. La medición de la uniformidad del camino registrada por los detectores de aceleración fue examinada con las aceleraciones verticales de dos automóviles. También se estudió la incidencia de la presión de los neumáticos con el equipo de prueba de vibración del automóvil.

La investigación ha concluido que es posible medir automáticamente la regularidad vertical del camino de grava. La desventaja del método con sensor de aceleración es que éste sólo ofrece información proveniente de la línea de conducción. La ventaja de este método es que permite recolectar un gran volumen de información en tiempo real. El método desarrollado también puede aplicarse a investigaciones con otros fines, tales como la medición de la rugosidad de la superficie de un camino.

1. INTRODUCCIÓN

Finlandia cuenta con una red total de carreteras públicas de 78.000 Km. de los cuales el 35% son caminos de grava. Debido a la elevada proporción de caminos de grava, crece la importancia de su estado y de su buena calidad transitable. Los caminos de grava, por lo general, integran la red de carreteras de bajo volumen, que no sólo prestan servicios en las zonas escasamente pobladas sino que también facilitan el transporte material de la producción básica, p.ej., silvicultura y agricultura. Respecto de los caminos de grava, el objetivo es disponer de un nivel de servicio que responda a las necesidades esenciales de

los usuarios de dichos caminos. La clasificación de los caminos de grava establece requisitos, por un lado, respecto de la condición estructural del camino y, por otro, del estado de su superficie; siendo este último el criterio más relevante. El estado de la superficie se define según la uniformidad del camino, su consistencia y presencia de polvo; por lo tanto, se han definido cinco categorías según el estado de los caminos. En la actualidad, el valor del estado de la superficie se determina visualmente mediante imágenes de referencia y definiciones textuales.

1.1 Objetivo

El objetivo de los contratos de mantenimiento es recurrir cada vez más a la gestión de datos con medios electrónicos. La gestión electrónica de datos eleva la eficiencia del proceso de licitación y el control de calidad, y permite automatizar la recolección, procesamiento y difusión de datos.

El actual sistema de inspecciones visuales es problemático porque es subjetivo y exige interpretación. Además, la falta de parámetros inequívocos dificulta la supervisión del estado a largo plazo de los caminos de grava y la calidad de los contratistas. Desde una perspectiva de calidad resulta necesario que el estado de los caminos responda a las expectativas de sus usuarios. En el año 2007 se puso en marcha un proyecto de investigación con la finalidad de crear un método más moderno y más objetivo de medición de la calidad de los caminos de grava. La investigación se centró en el estado de la superficie de los caminos (la uniformidad de la superficie), el criterio más importante.

1.2 Investigaciones Anteriores

A mediados de los 1990, en Finlandia se inició un estudio sobre métodos para medir la uniformidad de los caminos de grava y sus parámetros respectivos. La investigación contemplaba también el uso de equipos basados en un sensor de aceleración. Esta investigación temprana comparó la relación existente entre los valores de confort en la conducción, que fueron recolectados mediante una consola de conducción, y los resultados de la medición de uniformidad de unos 100 caminos de grava. Los resultados de la medición de uniformidad, y la clasificación de uniformidad que emanó de ellos, se derivaron de los valores del IRI (Índice de Rugosidad Internacional). Como conclusión del proyecto se sugirió que el valor IRI también podría aplicarse para describir la uniformidad y el confort del conductor, pero no para controlar la calidad del mantenimiento de los caminos de grava. [4]

2. DESARROLLO DEL MÉTODO PARA MEDIR LA UNIFORMIDAD DE LOS CAMINOS DE GRAVA

2.1 Clasificación de la Condición de los Caminos de Grava

La uniformidad longitudinal de los caminos de grava se evalúa de acuerdo a la clasificación de condiciones. La clasificación de la condición se basa en un soporte imagenológico estándar de cinco fases, con el cual se comparan las observaciones visuales del camino. La evaluación también toma en cuenta la consistencia del camino y su sección transversal. La clasificación de condición que se atribuye finalmente, de 1 a 5, está determinada por la peor condición del camino. Sin embargo, la propiedad dominante es la uniformidad del camino, ya que la ausencia de ésta es percibida por los usuarios como la característica más molesta. [7, 8]

En los contratos suscritos con anterioridad a 2008, el contratista a quien se atribuía un contrato regional de mantenimiento rutinario y periódico era el responsable de supervisar

la calidad del camino de grava utilizando la clasificación de condición. En la práctica, la evaluación de los caminos de grava se lleva a cabo en tramos de 2 kilómetros divididos en secciones de 100 metros. Cada sección de 100 metros se clasifica según una clasificación de 1 a 5, cada una de las cuales describe las diferentes condiciones del camino.



Imagen 1. Ejemplo de una fotografía estándar de un camino de grava de condición 2. [7]

2.2 Medición de las Vibraciones Causadas por la Irregularidad del Camino

La vibración se define como el movimiento de un punto imaginario alrededor de su posición de equilibrio causado por una fuente de vibración o estímulo. En un camino de grava, esto significa que las irregularidades del camino actúan como estímulos y hacen que el automóvil y sus pasajeros vibren. Las vibraciones ascienden hacia las estructuras del vehículo y sus pasajeros. Sin embargo, no toda la energía de los estímulos se transfiere en forma de vibraciones; sino que una parte de ellas se convierte, por ejemplo, en calor. Las vibraciones en un camino de grava están constituidas por vibraciones multifrecuencia, que son arbitrarias. [2, 5, 6]

Generalmente, con la medición de las vibraciones se calcula la variación de desplazamiento, la velocidad o la aceleración como una función de tiempo. Al estudiarse los caminos de grava, el desplazamiento de la parte baja del neumático se relaciona con las depresiones del camino mediante la función $h(t)$. Por su parte, la velocidad en la dirección vertical, v_z , y la aceleración, a_z , se derivan de la función de desplazamiento $h(t)$. Esto se ha representado en las fórmulas 1 y 2.

$$v_z = \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2h}{dt^2} \quad (2)$$

El efecto de la velocidad horizontal constante del vehículo, v_x , sobre la aceleración vertical del neumático, a_z , se representa en la fórmula 3.

$$a_z = \frac{h_x v_x^2}{l^2}, \quad (3)$$

Donde h_x es la magnitud del desplazamiento sobre la distancia recorrida l [m]

l es la distancia horizontal recorrida

El sensor de aceleración es bastante adecuado para medir las vibraciones mecánicas porque su funcionamiento se basa en una señal eléctrica generada por el movimiento de un cuerpo de masa conocida [6, 9].

2.3 Equipos de Medición

El equipo de medición que se utilizó en la investigación puede dividirse en dos grupos. El primero incluye el equipo de medición instalado en el automóvil para medir las aceleraciones verticales causadas por las irregularidades del camino y para transmitir los resultados obtenidos. El segundo incluye el equipo de gestión de datos (teléfono móvil y servidor) que se encarga de refinar, guardar y presentar los resultados de la medición al usuario.

El equipo instalado en el vehículo comprende un sensor de aceleración capacitivo y un medidor colocado en el parabrisas del automóvil. En esta investigación, es el medidor en el parabrisas el que transmite y refina los resultados medidos. El campo de medida del sensor de aceleración es de 12 g. El sensor de aceleración se monta en la suspensión de la rueda derecha trasera del automóvil, cerca del neumático (Imagen 2). La idea es minimizar la influencia de las diferentes propiedades del vehículo sobre los valores medidos. La unidad de medición colocada en el parabrisas utiliza la transmisión inalámbrica para enviar los datos a la aplicación del teléfono celular.



Imagen 2. El lugar de la suspensión de la rueda donde se monta el detector de aceleración.

El objetivo que se planteó al concebirse el dispositivo de medición fue elaborar un método y un dispositivo confiables y de fácil utilización. El prototipo se construyó sobre un medidor de fricción con una conexión Bluetooth incorporada. Al evaluar los resultados de las mediciones de la irregularidad, es indispensable conocer la velocidad de conducción, que es proporcionada por la aplicación del teléfono celular que usa GPS. En consecuencia, no hay necesidad de un sensor de pulso separado.

2.4 Informes de los Resultados de la Medición

Los parámetros de los segmentos de 100 metros, calculados a partir de la medición de los resultados, son almacenados en el teléfono celular que sirve de registrador de datos durante la fase de medición. La localidad donde se llevó a cabo la medición ya ha sido identificada y registrada en el sistema con ayuda de la dirección del camino proveniente del registro de caminos; cada fase de medición incluye también los metadatos relacionados con dicha medición. La información ya refinada hace mucho más fácil la preparación de informes; y los resultados de las mediciones también se pueden consultar en tiempo real en la pantalla del teléfono celular.

Los resultados de la medición se transmiten por medios inalámbricos a un portal Web de un servidor conectado a Internet. Los resultados de la medición pueden ser consultados en el portal, donde son exhibidos claramente en un mapa de base dinámica nítidamente codificado con colores (Imagen 3).

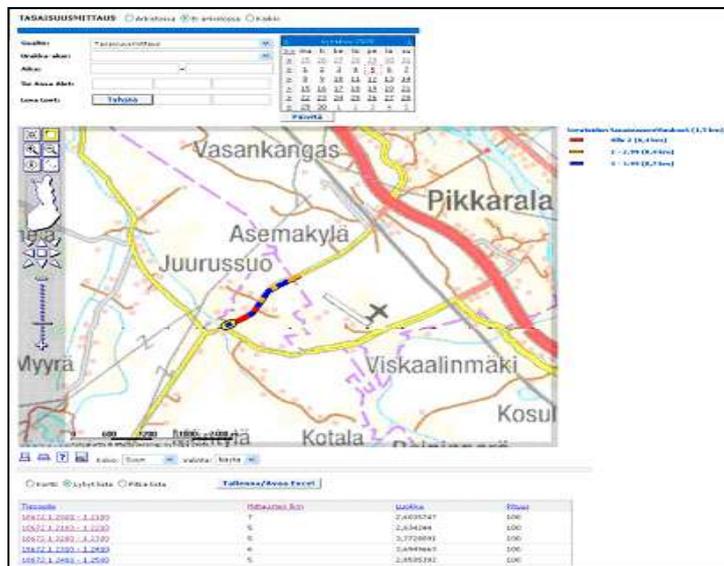


Imagen 3. Los resultados de las mediciones son accesibles mediante un navegador de la Web.

2.5 Posibles Fuentes de Error

Los errores que puedan ocurrir durante la fase de medición pueden dividirse en tres categorías: errores graves, errores sistemáticos y errores aleatorios.

Se definen como errores graves aquellos errores significativos que pueden ser causados por el responsable de la medición, por unas alteraciones momentáneas en los alrededores, o por un desperfecto temporal del instrumento de medición. [3]

Se definen como errores sistemáticos aquellos errores que alteran el resultado de la medición y que causados por el dispositivo de medición o por consecuencias de factores externos y de diferentes operadores. Todos los instrumentos de medición tienen cierta exactitud dimensional que es utilizada para medir la magnitud en cuestión. La incidencia de los factores extrínsecos lleva a errores relacionados con las condiciones de la medición. Los errores sistemáticos pueden ser causados por la posición del sensor de aceleración, que ha sido instalado en la suspensión de la rueda del automóvil. La situación óptima sería instalar el sensor en una posición totalmente horizontal. Sin embargo, en la práctica el sensor queda siempre en una posición ligeramente inclinada porque es difícil encontrar una superficie horizontal en el sistema de amortiguación de la rueda; además resultaría difícil verificar que éste se mantenga en una posición horizontal absoluta dado el reducido espacio disponible. La desviación de la posición del sensor puede significar que aquellas aceleraciones que no son estrictamente verticales y que también afectan el vehículo podrían influir en los resultados de la medición. El gradiente de la superficie del camino también induce a un pequeño margen de error, pero su influencia es sólo de un 0.5%. [3]

Un error aleatorio o estadístico siempre provoca algún grado de inexactitud en las mediciones. Un instrumento de medición con una precisión adecuada puede revelar un error estadístico; a su vez es posible reducir las consecuencias de un tal error si se efectúan varias mediciones del objeto seleccionado. [3]

2.6 Cuestiones que deben tenerse en cuenta al aplicarse el Método

Para obtener resultados fiables es indispensable prestar atención a las posibles fuentes de error al usarse este método de medición. El sensor de aceleración tiene que ser montado en la suspensión de la rueda derecha del automóvil tan firmemente como sea posible. El sensor tiene que ser instalado de tal manera que su posición sea lo más horizontal posible. La calibración se debe de llevar a cabo cuando el instrumento de medición se coloque en otro vehículo, o cuando sea reinstalado en el mismo vehículo después de haber sido retirado.

La medición real se llevará a cabo siguiendo la línea normal de conducción sin evitar los baches, a fin de permitir la recepción de una descripción integral. Además de ser responsable de la aplicación correcta del método de medición, el agente a cargo de las mediciones también debe tener en cuenta las depresiones y baches que están fuera de la línea de conducción. A esto hay que agregar que la presión de los neumáticos debe respetar las recomendaciones del fabricante.

3. MEDICIÓN

3.1 Método de Medición

Durante la fase de desarrollo del dispositivo de medición, la señal transmitida por el sensor de aceleración fue almacenada en un ordenador portátil utilizando un osciloscopio. Fue posible convertir la señal eléctrica de aceleración proveniente del sensor de aceleración en un valor real de aceleración ya que el nivel de sensibilidad del sensor era conocido. El voltaje proveniente del sensor era igual a la aceleración de 9.81 m/s^2 . Para calcular la media absoluta y el valor RMS (raíz promedio de cuadrados) ($\text{RMS} = \text{Sqrt}(\text{RMS_read} / \text{Coefficient}2) * 9.81$) se utilizó como base la señal de aceleración. Los valores se calcularon en segmentos de 1.2 segundos, los que también se utilizaron para calcular los promedios totales de una sección de 100 metros. El valor de la aceleración se interpretó y se clasificó utilizándose la media absoluta y los valores RMS, dado que éstos proporcionan una imagen relativamente exacta de la magnitud de las irregularidades del camino. [1]

La velocidad de conducción tiene un efecto significativo sobre las fuerzas de aceleración que actúan sobre el vehículo. Todas las aceleraciones verticales medidas con el sensor de aceleración fueron convertidas para igualar la velocidad comparativa v_{norm} (60 km/h) para permitir que los resultados de la medición fuesen comparables. La fórmula para calcular el coeficiente de cambio k se representa en la fórmula 4

$$k = \frac{v_{\text{norm}}}{v_m}, \quad (4)$$

donde v_m es la velocidad del vehículo durante la medición

La clasificación de los caminos se lleva a cabo en secciones de 100 metros. Se comparó el valor promedio absoluto de una sección de 100 metros con los valores límites preliminares de la clasificación. Se estableció una escala preliminar de clasificación como se muestra en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Valores límites preliminares aplicables a caminos de grava

Clasificación de uniformidad	Promedio de aceleración por 100 metros(auto1) $[m/s^2]$
5	0–5,2
4	5,3–9

3	9,1–22,4
2	22,5–30
1	>30

La velocidad mínima de medición se fijó en 30 km/h. Si la medición se llevó a cabo a una velocidad más baja, esto se mencionó en los resultados de la medición exhibidos en las páginas Web como un fallo en la velocidad. Por ejemplo, una velocidad baja puede ser resultado de un tramo de camino en muy malas condiciones, o a un intento de evitar baches. Se recolectaron para la sección una serie de datos de medición: los 10 valores medios absolutos más grandes y los valores RMS, así como los 20 valores de aceleración más altos que se convirtieron en velocidad comparativa. Asimismo, se recogieron otros datos básicos concernientes al agente a cargo de la medición, la hora y el tramo de camino, así como la velocidad media de medición. Además de los valores de uniformidad, se incorporó al programa una reserva para el gradiente transversal y longitudinal, la consistencia y la presencia de polvo en el camino.

Las mediciones relacionadas con el desarrollo del método se llevaron a cabo principalmente en la primavera y el verano del 2008. Mediciones de control adicionales fueron efectuadas durante el otoño del 2008. Se utilizaron dos automóviles de pasajeros para llevar a cabo las mediciones. Los tamaños de los neumáticos de los automóviles que se utilizaron para llevar a cabo las mediciones eran los siguientes. Auto 1: 225/50 R17 y Auto 2: 185/65 R15.

Las mediciones se llevaron a cabo en dos tramos de camino; ambos tenían segmentos con superficie uniforme y densa así como segmentos de superficie más irregular. La idea de medir varios grados de irregularidad buscaba investigar los tipos de niveles de aceleración que estos provocan y utilizar esa información para contribuir a la clasificación de los caminos de grava. La línea de conducción que se utilizó en los trabajos de medición fue seleccionada de tal manera que ésta incluyó el máximo número de baches posible. Encontramos numerosos pequeños baches al comenzar la sección caminera 3400-3500. El final de este tramo de camino era uniforme y la superficie del camino era densa.

El inicio del tramo 2250-2450 presentaba una superficie regular y densa, pero hacia el final del tramo había baches bastante grandes. Los baches se encontraban en fila y por lo tanto la línea de conducción fue seleccionada de manera que las mediciones incluyeron el máximo número posible de baches.

3.2 Efecto de Diferentes Factores en las Mediciones

En el otoño de 2008, las mediciones se realizaron con un sensor de 150g que abarca un espectro de medición más amplio, porque en el verano se hizo evidente que el espectro de medición del sensor de 12g probablemente no sería tan eficaz para atender las aceleraciones causadas por las grandes depresiones. La tarea de medición se llevó a cabo en el camino de grava 18613, sección 1. Las depresiones medidas tenían una profundidad aproximada de 3-4 cm. El objetivo era estudiar la operatividad del sensor de aceleración más grande en las tareas de medición de caminos de grava y averiguar el tamaño máximo de las aceleraciones causadas por las depresiones.

Las mediciones se llevaron a cabo midiendo dos veces una sección de unos 200 metros de camino y con ambos detectores. Los detectores fueron conectados uno al otro y después se colocaron en la suspensión de la rueda trasera derecha del automóvil.

La uniformidad de las aceleraciones verticales se estudió con ayuda de los dos automóviles por separado y en tres tramos de camino distintos. Los tramos de camino que fueron objeto de la medición incluyeron las secciones 2250-2450 y 3400-3500 en el camino 18672; y, en el tramo de camino 1, entre las secciones 835 a 985 de la carretera 18632. Fue exitosa la medición efectuada con los vehículos en cada una de las dos secciones que eran objeto del estudio en el camino 18672. La medición fue considerada exitosa ya que la línea de conducción tomó en cuenta la mayoría de las depresiones en el camino. Esto también aportó datos de referencia respecto del efecto que tuvieron las depresiones abiertas en ambos vehículos. Por otra parte, en el camino 18632 ambos vehículos llevaron a cabo varias mediciones a una velocidad de conducción de 40 y 50 km/h. Además, ambas velocidades se utilizaron para llevar a cabo mediciones con tres líneas de conducción diferentes. Las líneas de conducción en la dirección de medición fueron seleccionadas de manera tal que la primera estaba al extremo derecho y las siguientes siempre a casi un metro de distancia del centro del camino. En consecuencia, la línea de conducción de la última medición ocupó aproximadamente el centro del camino.

El efecto de la presión de los neumáticos en la aceleración vertical fue constatado el 15 de febrero del 2008. Se utilizó la unidad de pruebas de suspensión de la rueda en la prueba de aceleración (Imagen 4). Las vibraciones creadas por la unidad de pruebas son similares a las generadas por un camino real. Las presiones de los neumáticos variaron entre 2.0 a 3.0 bar (el intervalo de medición fue de 0.2 bar). Los neumáticos utilizados en el estudio eran de verano y de invierno con clavos; y su tamaño: 185/65 R15.

La prueba de suspensión de la rueda fue realizada en una unidad compuesta por dos placas de vibración. Cada placa somete al vehículo a una secuencia de vibraciones de unos siete segundos. Como resultado, la unidad muestra la eficiencia amortiguadora de la suspensión como un valor porcentual de los neumáticos medidos. La eficiencia de amortiguación se basa en el tipo de comportamiento de los neumáticos frente a la placa de vibración dentro de la frecuencia de resonancia ejercida durante el período de prueba.



Imagen 4. Para estudiar el efecto de la presión de los neumáticos se utilizó el equipo con placas de vibración

También se utilizó la unidad de pruebas de suspensión de la rueda para efectuar mediciones en los mismos autos (auto 1 y auto 2) en el otoño del 2008. Las mediciones se realizaron con el sensor de la aceleración colocado en la suspensión de la rueda trasera derecha para medir la aceleración causada por la vibración de las placas. Cinco mediciones se llevaron a cabo en cada vehículo. La señal de aceleración de la vibración de las placas fue almacenada en un ordenador portátil con Vibrocode (datos de la unidad de medición).

3.3 Calibración del Método de Medición

El método de medición debe calibrarse cada vez que se examina un vehículo distinto o cuando se vuelva a montar el dispositivo de medición. La calibración se realiza utilizando

los valores de aceleración provenientes de la vibración de la unidad de pruebas de la suspensión de la rueda. Los datos específicos del automóvil son incorporados al equipo utilizando el software. La fórmula para calcular un coeficiente de corrección específico para un automóvil dado se representa en la fórmula 5.

$$a_k = \frac{17,70}{v_5 \cdot \frac{9,81}{1280}} = \frac{22656}{v_5 \cdot 9,81}, \quad (5)$$

donde a_k representa al coeficiente de corrección que se alimenta al software y que es específico para cada automóvil, y v_5 es el promedio de la suma de los cinco valores absolutos más grandes.

3.4 Desarrollo del Método de Medición

El propósito del método de medición es que funcione de manera continua, con rapidez, tomando muestras provenientes del sensor de aceleración y calculando valores numéricos basados en las observaciones hechas y transmitiéndolos a la unidad de recolección de datos. El dispositivo de medición está diseñado para calcular, en base a las observaciones hechas durante 1.2 segundos, la suma de los valores absolutos de la aceleración, el cuadrado de las aceleraciones y recolectar los valores de aceleración más grandes en intervalos de 1.2 segundos. El dispositivo transmite estos datos en forma inalámbrica, a través de una conexión Bluetooth, a la unidad de recolección de datos. Los resultados finales de las mediciones se calculan sobre la base de estos valores de medición. Las necesidades futuras de medición del gradiente y el confort en la conducción se tomaron en cuenta en la interfaz de transmisión de datos.

Los cálculos realizados en la unidad de recolección de datos proporcionaron parámetros para cada tramo de cien metros de la línea del camino, los que se podrían utilizarse para la evaluación de la calidad. La unidad de recolección de datos convierte los valores de medición de cada intervalo de 1.2 segundos para que correspondan al llamado valor de velocidad estándar. Los valores de límites especificados para la velocidad estándar permitieron contar el número de baches. Hubo variaciones en los resultados provenientes de los diferentes autos. Los resultados se podrían comparar utilizando el coeficiente de calibración. Los datos obtenidos se transmiten de forma inalámbrica a un servidor en Internet. Los resultados medidos fueron estudiados y clasificados en función de los valores límite en el servidor. El resultado final fue presentado en diferentes colores en el mapa de las páginas Web. Imágenes y otros datos que se registraron se podrían agregar a los resultados.

4. RESULTADOS

4.1 La Medición de Diferentes Magnitudes de Irregularidad

Las mediciones arrojaron los resultados que se desglosan en la Tabla 2, donde se presenta el promedio calculado de aceleración de las aceleraciones absolutas y el valor de RMS. Los valores se calculan siempre en intervalos de 1.2 segundos, lo que se corresponde al tiempo de transmisión de datos del medidor final. Además, la tabla también muestra el total de los valores promedio para las secciones de cien metros que se estudiaron. Los resultados muestran que la sección rugosa del camino es tres veces más larga que la sección que está pareja.



Imagen 5. Superficies de las secciones estudiadas. Izq.: la sección entre 2250 y 2450; der.: la sección entre 3400 y 3500.

Tabla 2. Resultados de mediciones en el camino 18672

Carrera 18672 Distancia 2250-2350			Distancia 2350-2450			Distancia 3400-3500		
Tiempo [s]	Aceleración absoluta promedio $[m/s^2]$	RMS $[m/s^2]$	Tiempo [s]	Aceleración absoluta promedio $[m/s^2]$	RMS $[m/s^2]$	Tiempo [s]	Aceleración absoluta promedio $[m/s^2]$	RMS $[m/s^2]$
0,20	5,02	6,23	6,01	17,26	24,53	0,20	31,73	43,20
1,21	7,74	9,73	7,21	44,10	59,02	1,21	14,29	19,30
2,41	16,67	23,59	8,41	52,55	69,18	2,41	10,63	14,07
3,61	6,67	11,16	9,61	13,64	19,03	3,61	11,88	14,59
4,81	8,57	11,45	10,81	23,72	37,18	4,81	9,53	12,25
prom.	8,95	12,43	prom.	30,26	41,78	prom.	15,61	20,68

La representación visual de la señal de aceleración mostró que las secciones con mayor cantidad de depresiones difieren claramente de aquellas con secciones más regulares. Las aceleraciones más grandes llegaron hasta el límite de la capacidad de medición del sensor de aceleración, es decir 12g (Imagen 6).

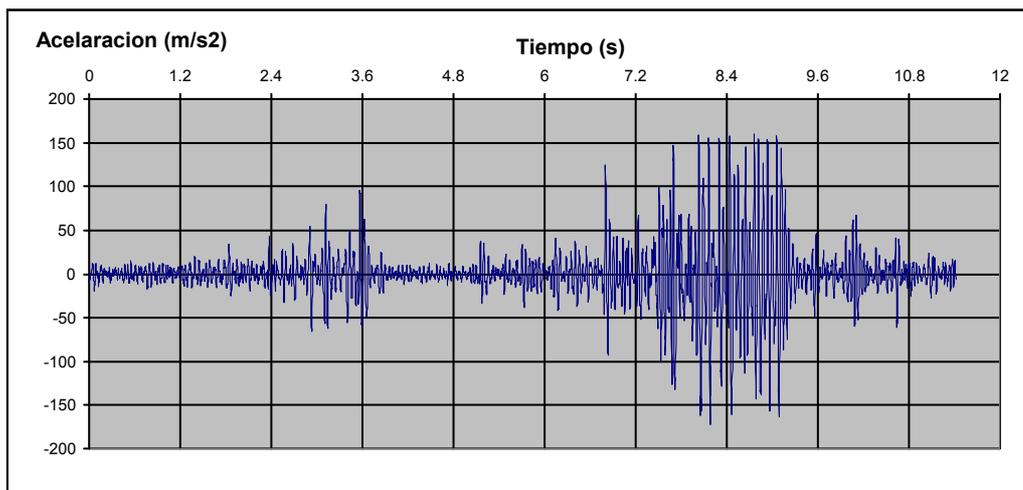


Imagen 6. Gráfica de aceleración de la sección vial entre 2250-2450. El segmento irregular después de la sección a mitad del camino causa aceleraciones significativas.

4.2 Aplicabilidad del Método de Medición a Diferentes Vehículos

Se decidió calcular los valores del camino 18762 utilizando también otro vehículo (auto 1). Cuando se compararon los respectivos valores de la Tabla 2 con los valores provenientes

del vehículo utilizado con fines comparativos, se observó que los valores previamente obtenidos superaban de 1.1 a 2.3 veces aquellos del auto 1. La mayor diferencia se presentó en la sección de camino 2350-2450, y la explicación se encuentra en el hecho que la línea de conducción del auto 1 recorrió un trayecto levemente distinto. En consecuencia, el número de depresiones dentro de la línea de conducción que causan las mayores aceleraciones era menor que en la medición previa que realizó el auto 2.

Ambos automóviles fueron empleados para realizar mediciones en el camino 18632. La Tabla 3 presenta un resumen de los resultados de las mediciones obtenidas con los dos vehículos. La velocidad de cada uno, al efectuar la medición, fue de 40 ó 50 km/h. Se realizó una conversión de todos los resultados de la tabla para que correspondieran a una velocidad de conducción de 60 km/h. La comparación de los resultados de obtenidos por automóviles usando una misma velocidad de conducción y una misma línea de conducción, demuestra que los valores de medición del automóvil 1 son mayores en una proporción de 0.67 a 0.82 respecto de aquéllos del auto 2. La disparidad se debe a las diferencias en neumáticos, suspensiones y estructuras de los automóviles. El emplazamiento y la posición de los sensores de aceleración también influyeron en los resultados. No se observan grandes contrastes en los valores de las mediciones recolectadas por el mismo auto.

Tabla 3. Aceleraciones calculadas de los dos automóviles en el camino 18632. Línea de conducción: 1, a la derecha extrema; 2, en medio del carril derecho; y 3, en la línea central del camino

Vehículo	Línea de conducción	Velocidad [km/h]	Aceleración absoluta prom.100m $[m/s^2]$	Aceleración absoluta prom 150m $[m/s^2]$	RMS prom. 100 m $[m/s^2]$	RMS prom. 150 m $[m/s^2]$
auto 2	1	40	18,90	17,96	25,63	23,53
auto 1	1	40	13,10	12,13	17,28	15,91
auto 2	2	40	16,44	14,27	21,25	18,33
auto 1	2	40	12,30	10,17	15,48	12,91
auto 2	3	40	14,41	12,83	17,99	16,14
auto 1	3	40	11,31	10,03	14,20	12,61
auto 2	1	50	17,88	16,98	24,37	22,97
auto 1	1	50	12,80	12,29	16,40	15,70
auto 2	2	50	17,14	15,00	21,66	19,03
auto 1	2	50	11,66	10,45	14,64	13,19
auto 2	3	50	15,46	13,81	19,41	17,34
auto 1	3	50	12,42	11,33	15,72	14,51

4.3 Incidencia de la Presión de los Neumáticos en el Valor de la Medición

La presión de aire examinada se situó en 2.0–3.0 bar y se demostró que las aceleraciones de los neumáticos se elevaron de manera casi uniforme en relación con el incremento de la presión del aire. Esto se puede explicar por el hecho que la presión de los neumáticos afectó la constante de la suspensión: un incremento 0.2 bar de la presión de aire aumenta la aceleración máxima promedio en 3.02 m/s² en los neumáticos de verano y en 3.66 m/s² en los neumáticos de invierno. El efecto sobre la aceleración promedio fue significativamente menor, dado que los valores respectivamente son 0.52 m/s² en los neumáticos de verano y 0.82 m/s² en los de invierno. Las cifras 7 y 8 presentan el efecto de la presión de los neumáticos sobre los valores máximo y promedio de las aceleraciones. El promedio de aceleración ha sido calculado sobre la base de la duración de la vibración aplicada al neumático, es decir, siete segundos aproximadamente.

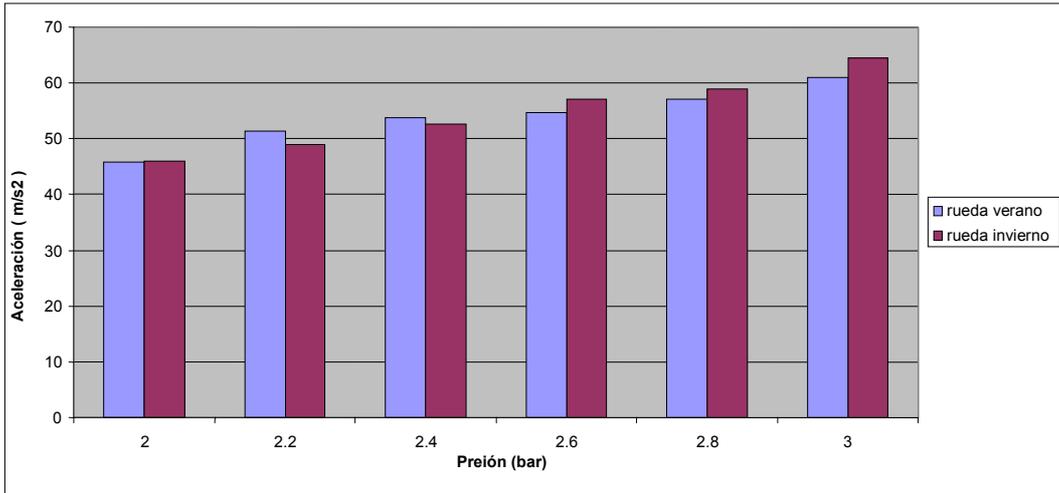


Imagen 7. Efecto de la presión del neumático sobre el valor máximo de aceleración.

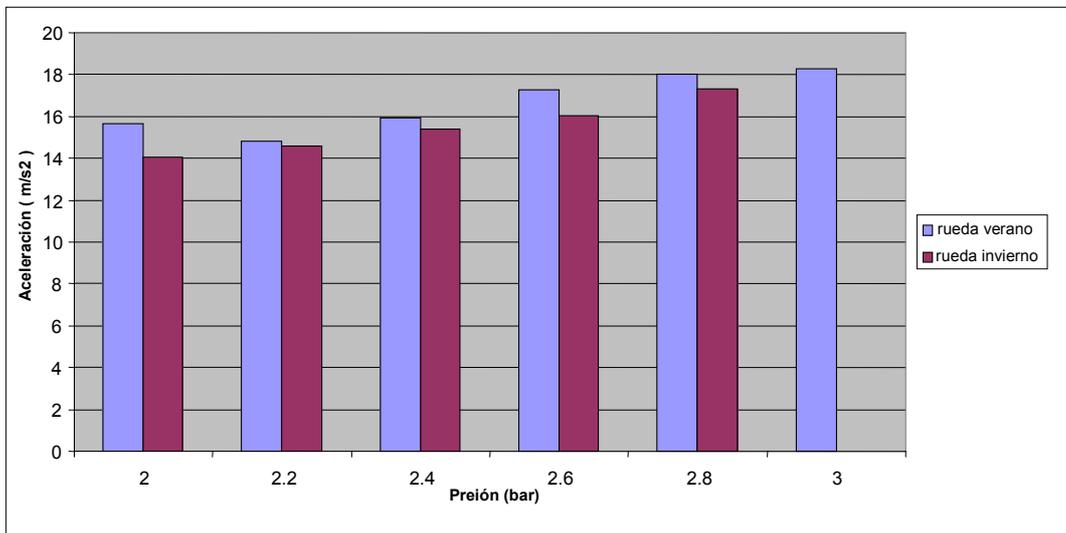


Imagen 8. Efecto de la presión del neumático sobre el promedio de aceleración absoluto.

Parece ser que el efecto de la presión de los neumáticos sobre la aceleración es insignificante con valores bajos de aceleración, pero, al contrario, éste parece aumentar en las grandes aceleraciones (Imagen 9).

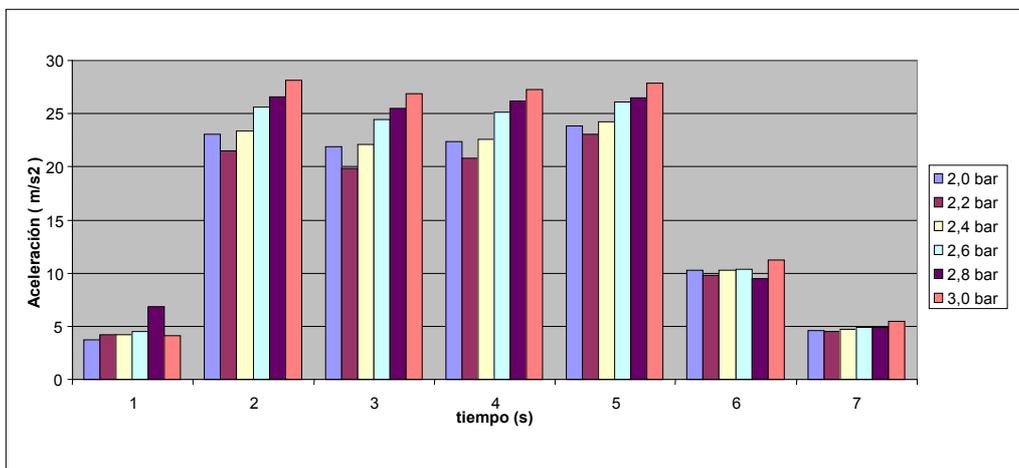


Imagen 9. Aceleraciones evaluadas en secuencias de un segundo.

4.4 Aplicabilidad de la Unidad de Prueba de Suspensión de la Rueda para Calibrar el Método de Medición

Las aceleraciones medidas desde las suspensiones de las ruedas se calcularon en intervalos de seis segundos sobre la base del promedio absoluto de aceleración. No se registró una gran dispersión en la magnitud de las secuencias de aceleración evaluadas por el mismo vehículo. De los dos vehículos usados en el estudio, el auto 1 mostró una menor aceleración en la secuencias de vibraciones de seis segundos. Los resultados de las mediciones del auto 1 fueron, en promedio, aproximadamente 0.8 veces mayores en comparación con los del auto 2. Las mediciones realizadas en los caminos de grava durante el verano de 2008, resultaron ser 0.67 a 0.82 veces mayores para el auto 1 respecto de las del auto 2 (un promedio aproximado de 0.75). Sobre la base de estos resultados, se concluyó que la unidad de pruebas de suspensión de la rueda es adecuada para calibrar el método.

4.5 Mediciones Utilizando el Sensor de Aceleración con un Campo de Medida más Amplio

Se decidió hacer mediciones utilizando también un sensor de aceleraciones de mayor capacidad (150 g). La Tabla 4 desglosa los resultados de las mediciones provenientes de la misma sección de camino donde se usaron detectores de diferentes capacidades.

Tabla 4. Resultados de las mediciones del 9 de octubre de 2008, cuando la misma sección de camino se evaluó utilizando dos campos de medidas diferentes.

Área de medición del sensor usado (± g)	Aceleración máxima a la velocidad de medición 40 km/h (g)	Aceleración máxima convertida para corresponder al a velocidad de comparación $v_{norm} = 60 \text{ km/h}$ (g)
12	15,5	23,3
12	15,7	23,6
150	11,1	16,6
150	12,5	18,7

Las depresiones en el camino 18613, que tenían una profundidad aproximada de 3 a 4 cm. (Imagen 10), causaron aproximadamente 12g de aceleración en el sensor de 150g. Las mismas depresiones causaron más de 15g de aceleración en el sensor de 12g. La aceleración de 15g en el sensor de menor capacidad se puede explicar por el hecho que cuando se excede el campo de medida, pierde precisión la aceleración registrada por el sensor.



Imagen 10. Había grandes depresiones en la línea de conducción del camino 18613.

La Imagen 11 muestra los gráficos de aceleración de ambos detectores, obtenidas en el camino 18613. El gráfico demuestra que la capacidad de diferenciación del sensor con un campo de medida más amplio es mucho menor frente a niveles de aceleración más bajos. El gráfico que utiliza los datos del sensor muestra las aceleraciones provenientes de depresiones mayores del camino; pero con diferenciaciones de aceleración inferiores a 10g, el gráfico ni siquiera se acerca a la capacidad de diferenciación del sensor más pequeño. El sensor pequeño de 12g revela las aceleraciones más comunes causadas por la superficie del camino, pero no es muy adecuado para la clasificación de irregularidades mayores tales como los baches porque su campo de medida es muy estrecho. Sin embargo, el sensor pequeño de 12g resulta más adecuado para clasificar la regularidad que el sensor de 150g, porque éste último no logra diferenciar con precisión los bajos niveles de aceleración. Además, técnicamente es posible ampliar el campo de medida del sensor de 12g si se utiliza una velocidad de conducción más baja.

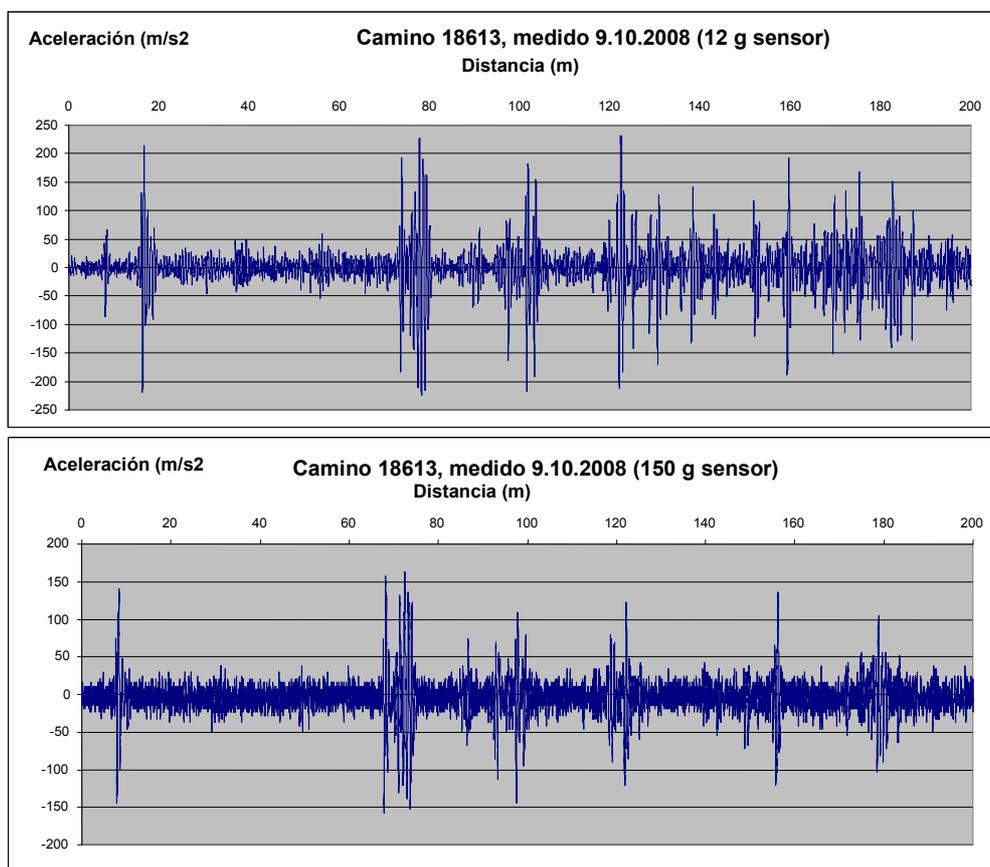


Imagen 11. Cifras de aceleración de los sensores de 12g y de 150g

obtenidos en el camino de grava 18613.

5 CONCLUSIONES

La medición de la regularidad de los caminos de grava juega un papel importante en el mantenimiento rutinario y periódico de la red de caminos de clasificación más baja. La evaluación de la regularidad sobre la base de las observaciones visuales requiere ser complementada con nuevas técnicas de medición. El método automático desarrollado para medir la regularidad de los caminos de grava parece ser muy adecuado para medir, supervisar y administrar la regularidad de los caminos de grava. La desventaja de los resultados provenientes de las mediciones efectuadas por los sensores de aceleración es el hecho que solamente se generan datos provenientes de la línea de conducción del automóvil. En el futuro, una línea de investigación podría ser estudiar la posibilidad de medir y combinar la visión computarizada a los datos de medición provenientes del sensor de aceleración. La visión computarizada haría posible observar depresiones en el camino en todo su alcance y también monitorear el ancho del camino.

El método desarrollado hace posible la recolección automática de datos sobre la regularidad de los caminos de grava. Hace posible recolectar grandes volúmenes de datos y monitorear el desarrollo de los datos de regularidad. En consecuencia, será posible, y con mayor eficiencia que antes, controlar la evolución y reaccionar ante las alteraciones de la regularidad de la red de caminos de grava. En el futuro, la existencia de un historial de datos también ofrecerá la posibilidad de introducir nuevos tipos de análisis sobre la evolución del estado de los caminos de grava, por ejemplo, cómo es que evoluciona la regularidad de un camino de grava nuevo durante un cierto período específico de tiempo. El monitoreo de largo plazo provee información importante para quienes toman decisiones respecto de la evolución del estado de la red de caminos.

El método de medición desarrollado en este proyecto es particularmente adecuado para evaluar una red de caminos, porque éste se puede realizar en tiempo real. Esta perspectiva de tiempo real abre variadas y nuevas posibilidades para impulsar la gestión del estado de la red vial, para evaluar la calidad de los contratistas y para tener presente los riesgos a la seguridad de una manera más eficiente. El desarrollo del método de medición también ha considerado la posibilidad de incluir, como parte del método, otras variables de medición. El método de medición muy probablemente será aplicable también a la medición de la regularidad durante el invierno. Durante el invierno, la unidad de medición también será útil para medir la fricción. Finlandia concluyó en el 2009 el método de medición en los contratos; posteriormente fue modificado; sin embargo, este método podría aplicarse también a los nuevos contratos con algunas modificaciones.

REFERENCIAS

1. CCD-Fotoniikka Oy (2008). Kitkamittarin käyttö tasaisuuden mittauksessa, version 1, 17.1.2008.
2. Dahlström, Seppo & Syrjälä, Kai. (1984). Matalataajuuksinen värähtely ja sen vaikutus ihmiseen. Helsinki 1984, Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta (MATINE), report series A. 41 p.
3. Hiltunen, Erkki & al. (1993). Mittaustulosten esittäminen ja niiden luotettavuuden arvioiminen. University of Turku: offset. University of Turku, Institute of Biomedicine, Medical Physics.
4. Hiltunen, Kari & al. (1995). Sorateiden tasaisuustunnusluku. 2nd ed. Helsinki: Oy Edita Ab. 22 p. Finnish Road Administration report 62/1995.
5. Marjanen, Ykä. (2002). Koko kehon värähtelyn analysointi työkoneissa. University of Oulu, Department of Mechanical Engineering, Master of Thesis. 112 p.
6. Nevalainen, Seppo (1999). Mekaanisten värähtelyjen mittausten kartoitus. Helsinki. The centre for metrology and accreditation report J8/1999. 26 p.

7. Sorateiden kuntoluokitus [Verkkodokumentti]. Saatavan PDF-tiedostona: <http://www.tiehallinto.fi/pls/wwwedit/docs/7511.PDF> [Vii-tattu 2.12.2008].
8. Tiehallinto (2007a). Kunnossapidon tuotekortit 22.1.2007 [webdocument]. Available in PDF-file: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/alueurakat/tuotekortit2007.pdf> [7.1.2008].
9. Ylitalo, Mika. (2005). Kiihtyvyyssanturien automaattisen testausjärjestelmän kehitys. University of Oulu, Department of Electrical and Information Engineering, Master of Thesis 62p.