

# Medición de Irregularidad Superficial en Pavimentos de Aeropuertos, Viales y Ciclovías

Erwin Kohler  
+56 2 2919 9880  
ekohler@dynatest.com  
Dynatest Chile

## RESUMEN

Este artículo explica las semejanzas y diferencias que existen en la actualidad en las mediciones de la irregularidad de pavimentos en vías, ciclovías y aeropuertos.

Se presentan técnicas que se recomiendan para la adecuada evaluación de la irregularidad superficial. Equipos conocidos como perfilómetros láser se utilizan para medir el perfil de elevaciones, pero como las velocidades de operación y la geometría de ejes y ruedas son diferentes entre automóviles, aeronaves y bicicletas, entonces la forma de utilizar e interpretar estos perfiles de la superficie del pavimento es también distinto.

Se abordan las diferentes técnicas disponibles para analizar los perfiles de pavimentos, incluyendo la utilización del indicador "Boeing Bump Index" y cálculos de aceleraciones verticales en los aviones a partir de los perfiles medidos en pistas de aterrizaje y calles de rodajes, y cubrirá el muy conocido indicador IRI para calles y carreteras (International Roughness Index), y el novedoso indicador "Bicycle Profile Index" o BPI para ciclovías. La primera parte describe las características de los diferentes equipos de medición que se pueden utilizar, y el resto del artículo se enfocará en los análisis de los datos y como conviene reportarlos y resumirlos.

*Palabras clave:* Pavimentos, condición funcional, perfilómetro laser, IRI, Boeing Bump Index, Bicycle Profile Index, aeropuertos, ciclovías

## ABSTRACT

This article explains the similarities and differences that exist today in measurements of pavement surface roughness in roads, airports, and bikepaths.

Techniques recommended for proper evaluation of the surface roughness are presented. Equipment known as laser profilometers are used to measure the elevation profile, but as operating speeds and geometry of axles and wheels are different from automobiles, aircraft and bicycles, then the way to use and interpret these pavement surface profiles is also different. The different techniques available address to analyze pavement profiles, including the use of the indicator "Boeing Bump Index" and calculations of vertical accelerations on airplanes from profiles measured on runways and taxiways, and cover the well-known IRI indicator for streets and roads (International Roughness Index) and the novel indicator "Bicycle Profile Index" or BPI for bikepaths. The first part describes the characteristics of the various instruments that can be used, and the rest of the paper will focus on the analysis of the data and how to properly report and summarize them.

*Keywords:* Pavements, functional condition, laser profiler, IRI, Boeing Bump Index, Bicycle Profile Index, airports, bikepaths

## 1. INTRODUCCIÓN

Hay un aspecto de la serviciabilidad de las obras de infraestructura de transporte que tiene que ver con la irregularidad del perfil superficial de los pavimentos. Se espera continuidad y un mínimo de regularidad en los pavimentos, sin cambios bruscos de pendientes, ni deformaciones del tipo "peldaños". Ni siquiera perfiles tipo sinusoidales si es que la longitud y la amplitud de onda combinadas con la velocidad de circulación causan incomodidad o riesgo operacional.

Para cuantificar la "calidad del rodado" (en inglés "ride quality") sobre los pavimentos se utilizan hoy en día equipos que se conocen como perfilómetros láser, aunque estos conviven todavía con equipos anteriormente utilizados [1].

## 2. PERFILÓMETROS PARA INGENIERÍA DE TRANSPORTE

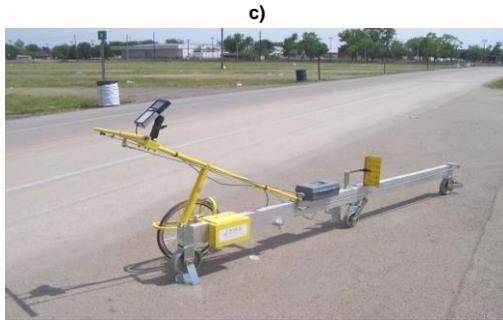
Mediciones del perfil de pavimentos a baja velocidad han existido por mucho tiempo, pero la medición a alta velocidad empezó en los años '60 en General Motors [2]. Aún se sigue utilizando un aparato simple que se conoce como regla rodante de 3 metros. A este aparato se le conoce en Chile como "Hi-Lo" y sus resultados se especifican como lisura del pavimento.

a)



b)





**FIGURA 1: Regla Rodante de 3m o “Hi-Lo”**  
 a) fotografía de 1940 en USA (cortesía Larry Scofield)  
 b) ejemplo de equipo en Chile  
 c) ejemplo de equipo electrónico

La medición con este aparato no corresponde al verdadero perfil de la superficie, sino que “inventa cosas” en el perfil. El error depende de la geometría del aparato, p.ej. la separación entre ruedas. Aplica un factor (detalles se ven más grandes o más chicos). El factor que aplica depende de la longitud de onda de los defectos del pavimento. Puede incluso darse el caso teórico en que la rueda medidora del medio vaya subiendo y bajando al mismo tiempo que las ruedas de los extremos, si la geometría de los defectos coincide con la geometría del aparato, dando como resultado un perfil plano perfecto.

Para reducir el efecto de longitudes de ondas que coincidieran con la regla de 3m, se inventaron en USA los equipos conocidos como perfilógrafos. Éstos dibujan una traza del perfil en relación a unos patines de ruedas en los extremos. Se cuenta la cantidad de deformaciones que exceden un cierto umbral en la traza.

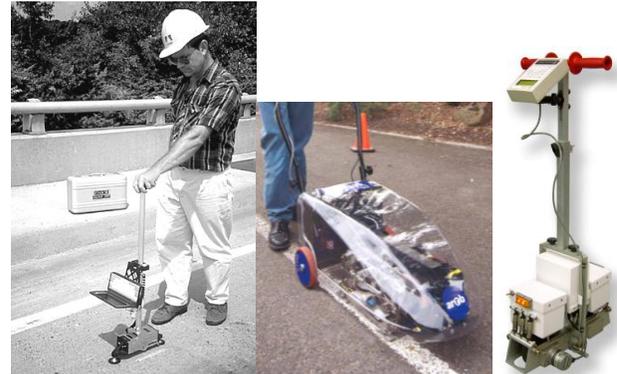


**FIGURA 2: Ejemplos de Perfilógrafos**

Otro tipo de aparatos que se utilizan en ingeniería de pavimentos son los llamados “aparatos tipo respuesta”, que permiten contar aquellas respuestas del vehículo que causan desplazamientos relativos entre el eje y la carrocería de del automóvil o carro que se utiliza para medir.

Este desplazamiento relativo está relacionado con la percepción que se hagan las personas de la calidad, pero tienen en inconveniente que registra detalles acerca de las deformaciones del pavimento, y para hacer que las mediciones sean comparables con otras mediciones es necesario un proceso de calibración.

Las cosas mejoran un poco cuando se tienen en cuenta aparatos perfilométricos del tipo inclinómetros, que son precisos, capturan hasta las mayores longitudes de onda, pero se operan a velocidad de caminata.



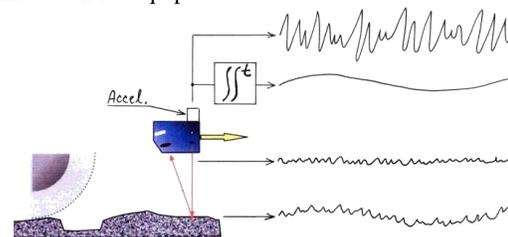
**FIGURA 3: Inclinómetros para la Evaluación del Perfil de Pavimentos**

Estos se usan para control del perfil durante la etapa de construcción del pavimento, y también se utilizan en los procesos de certificación de perfilómetros láser.



**FIGURA 4: Inclinómetro utilizado para Medir el Perfil de una Carretera**

Llegamos así a los aparatos que dominan en la actualidad la evaluación de los perfiles de pavimentos: los perfilómetros láser o perfilómetros inerciales. Estos equipos combinan la señal de un sensor laser que mide la distancia vertical al pavimento, con la señal de un acelerómetro que permite conocer el desplazamiento vertical del sensor laser mientras este está midiendo, y estas dos señales se combinan con una medición precisa de la distancia. Se les llama perfilómetros inerciales porque la referencia que utilizan es inercial, asumiendo una elevación promedio de los últimos metros recorridos para cuantificar las deformaciones que existen en el perfil. Tienen la gran ventaja de poder operar a altas velocidades porque no requieren hacer contacto con la superficie del pavimento, pero por otro lado al no tener una referencia fija sino que inercial, el perfil que resulta es un perfil filtrado que adolece de longitudes de onda por sobre un cierto límite especificado en los equipos.



**FIGURA 5: Esquema de Operación del Sensor Láser y el Acelerómetro en un Perfilómetro inercial**  
 (Cortesía Anders Sørensen)

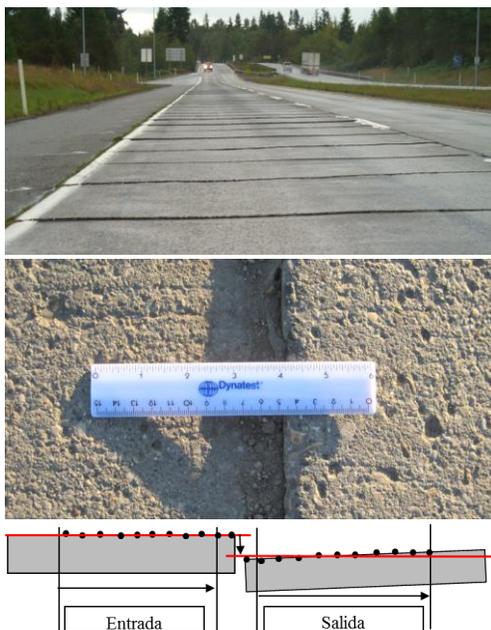


**FIGURA 6: Perfilómetro Láser Trabajando en el Aeropuerto de Santiago**  
(Elaboración propia)

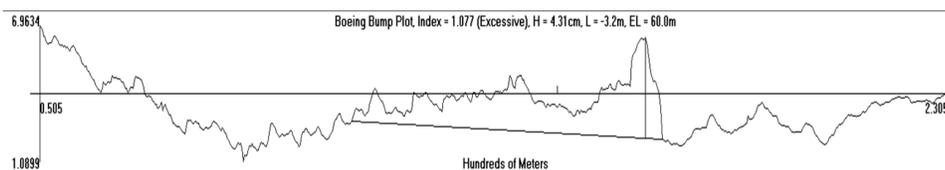
### 3. CARRETERAS

En carreteras los perfilómetros láser se usan para calcular el IRI o algún otro índice que representa la respuesta de los vehículos. En Chile el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas explica cómo medir y reportar el IRI, y los valores máximos aceptables para los diversos tipos de pavimentos. Por otro lado, los contratos de concesión también indican valores máximos aceptables de este parámetro. Mientras más irregularidades haya en el pavimento, mayor el valor del IRI. Las irregularidades pueden deberse a defectos de construcción, o a la acumulación de deformaciones causadas por la acción de las cargas repetidas de tráfico o la aparición de defectos como baches o escalonamiento entre la losas de pavimento de hormigón.

Un buen perfilómetro, además de reportar el IRI, debe ser capaz de reportar el escalonamiento en cada junta, lo que se hace usando los datos de elevación del perfil antes y después de la junta.



**FIGURA 7: Escalonamiento en Pavimentos, que Afecta al IRI**  
(Elaboración propia)



**FIGURA 9: Ejemplo de un Resalto BBI**  
(Elaboración propia, ejemplo del programa ProFAA)

### 4. AEROPUERTOS

La suspensión de los automóviles y vehículos pesados está hecha para absorber irregularidades, y ayudar a la comodidad del pasajero. Pero el sistema de suspensión de un avión está diseñado para absorber la energía durante el aterrizaje y por lo tanto tiene menos capacidad de ayudar a la comodidad del pasajero ante irregularidades del pavimento.

La rugosidad de pavimentos de aeropuertos se define en términos de fatiga en componentes de aviones (irregularidades que hacen aumentar esfuerzos y desgaste) y/u otros factores que pueden afectar la operación segura de las aeronaves.

El Índice de Perfil, que es el resultado de medir con perfilógrafo, todavía se utiliza en el control de la condición del pavimento. Pero cada vez más va ganando aceptación el Boeing Bump Index [3], que está descrito en la Advisory Circular AC150/5380-9 de la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos [4]. Este documento describe dos tipos de irregularidad:

- Evento de resalto individual: son eventos aislados donde se producen cambios en la elevación del pavimento sobre una distancia relativamente corta de 100 metros o menos. Los ocupantes y los componentes del avión sienten el impacto como un choque o sacudida repentina.
- Rugosidad del Perfil: desviaciones de perfil superficial presentes sobre una porción de la pista que pueden aumentar la fatiga en componentes del avión, reducir la acción de frenado, afectar las operaciones de la cabina, o causar molestias a los pasajeros. Incluso si no causa molestias a los pasajeros, todavía puede disminuir la seguridad operacional del avión.

Para calcular el BBI se debe construir una regla virtual entre dos puntos sobre el perfil longitudinal de la elevación de una pista y medir la desviación de la regla hasta la superficie del pavimento. El procedimiento reporta "altura del bump" como una desviación máxima (positiva o negativa) de la regla a la superficie de pavimento. El procedimiento grafica la altura y longitud del resalto versus los criterios de aceptación. Considera longitudes (longitudes de onda) de la regla de hasta 120 metros.



**FIGURA 8: Ejemplo de Irregularidad en el Perfil de Pavimento de Pista de Aeropuerto**

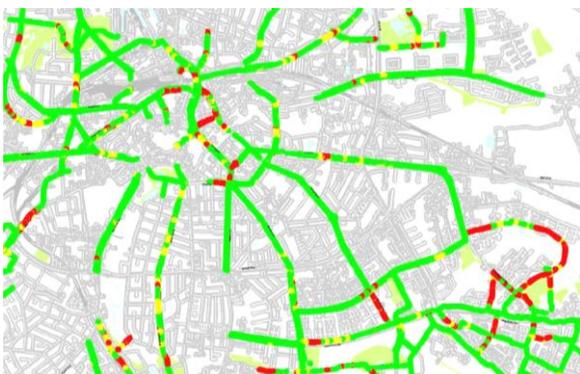
## 5. CICLOVÍAS

Atendiendo nuevamente al hecho que la geometría de las bicicletas es diferente a la de los automóviles, el uso de IRI no es apropiado para ciclovías. Pero a partir del perfil longitudinal medido cada 2.5cm es posible calcular el Bicycle Profile Index o BPI [5], que se calcula aplicando un filtro Butterworth que enfoca los resultados en longitudes de onda de entre 0.025 y 5 metros. El resultado del BPI se puede reportar por ejemplo en intervalos de 50 m, y representarse en el SIG de la entidad a cargo de las ciclovías. Numerosas ciudades europeas contratan anualmente este tipo de mediciones para decidir las secciones de la red que requieren mantenimiento.



**FIGURA 1: Ejemplo de Vehículo Equipado con un Perfilómetro Láser para Evaluar Ciclovías**

(fotos Erwin Kohler)



**FIGURA 2: Mapa de Resultados de BPI Indicando el Nivel de Confort en las Ciclovías**

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

Perfilómetros láser son los equipos que proveen la forma moderna de evaluar los perfiles de pavimentos, sean estos para automóviles, aeronaves o bicicletas. Los perfilómetros láser miden sin hacer contacto con la superficie, miden bien, y miden rápido.

Para carreteras se calcula el IRI, que puede traducirse como Índice de Rugosidad Internacional. Este índice apunta a la comodidad de los pasajeros. Se expresa en unidades de pendiente (m/Km, pulgadas/milla).

Para aeropuertos se calcula el BBI, que es el Boeing Bump Index. Es un valor adimensional, que apunta a identificar resaltos individuales y también a promedios por sección o rama del aeropuerto (pistas o rodajes). Apunta a la seguridad operacional más que a la comodidad de los pasajeros.

Para ciclovías se calcula el BPI, que es el Bicycle Profile Index. Similar al IRI, este índice apunta a la comodidad y seguridad de los usuarios. Se instala un perfilómetro láser en un vehículo de tamaño pequeño y se obtiene el perfil longitudinal cada 2.5cm.

## REFERENCIAS

- [1] Kohler, E. "Diagnóstico de Serviciabilidad de Pavimentos Urbanos en Chile". Tesis de Magister, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- [2] Spangler, E.B. and W.J. Kelly "GMR Road Profilometer - A Method for Measuring Road Profile" Highway Research Record 121 (1966) pp 27-54.
- [3] ASTM Committee E17 "New Specification for Boeing Bump Index Computations Based on Bump Template Simulations" ASTM International Work Item WK41777
- [4] Federal Aviation Administration "Advisory Circular 150/5380-9 - Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness", Office of Airport Safety & Standards - Airport Engineering Division
- [5] Jensen, N., Arshadi, M "Improving Comfort on Copenhagen Cycle Tracks" Velo-city 2007, Munich.