

UTILIZACION Y CALIBRACION DE RUGOSIMETROS EN CAMINOS NACIONALES

Sergio Gonzalez y Walter Brüning
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile

Resumen

Las metodologías actuales de planificación de caminos tienen en la rugosidad una de sus variables básicas. A través de ella es posible ligar el estado de la carpeta, función principalmente de la inversión, política de conservación y tránsito, con los costos de operación de los usuarios. Su correcta medición y predicción resulta entonces fundamental para el objetivo de minimizar el costo total de funcionamiento del sistema vial. La aplicación de este concepto integral de planificación caminera se ha visto limitado fuertemente en nuestro país por no disponerse de equipos de medición de rugosidad, aspecto que limita no sólo la utilización de relaciones causa-efecto derivadas en otros ambientes, sino también el trabajo experimental propio orientado a desarrollar nuevas relaciones.

En este trabajo se presenta el primer esfuerzo realizado en nuestro país por utilizar y calibrar rugosímetros a través de dos equipos disponibles: MAYSMETER (U.S.A.) y NAASRA (Australia), el primero instalado en un carro especial de arrastre y el segundo en un vehículo St. Wagon. Se entregan los resultados de un trabajo experimental que permite recomendar el uso de los equipos y su rango de aplicabilidad en nuestro país. Se entregan valores de rugosidad para diferentes tipos de carpetas y estado (asfalto, hormigón, ripio, tierra) y la correlación existente entre ambos equipos utilizados. Por las características del equipo NAASRA se entregan relaciones entre las rugosidades obtenidas y la velocidad, presión de neumáticos y sobrecarga en el vehículo. Por último, se realiza un análisis comparativo entre las rugosidades obtenidas a través del índice de serviciabilidad para pavimentos de hormigón y asfalto y las rugosidades medidas, entregándose recomendaciones para mejorar dicha metodología.

- (1) Este trabajo ha contado con financiamiento parcial del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto N° 0119/84) y de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

1. Introducción

La magnitud de recursos involucrados en vialidad ha representado una parte importante del total de recursos sociales destinados a inversión en los últimos años en nuestro país. La repavimentación de los principales caminos nacionales, producto de un deterioro acelerado en la década del 70, y en menor grado, la pavimentación y la construcción de segundas calzadas (con repavimentación de la calzada original) han sido los principales tipos de proyectos realizados.

Esta misma situación ha creado una toma de conciencia de la necesidad de mantener en la mejor forma posible este valioso patrimonio nacional desarrollándose, como consecuencia, un programa de seguimiento de pavimentos y obteniéndose importantes recursos financieros para conservación en los próximos años.

Las metodologías actualmente en uso para los estudios de evaluación de proyectos viales sean éstos de inversión o conservación, se apoyan fundamentalmente en la variable rugosidad que resume el estado de la carpeta. A través de la variación en la rugosidad es posible explicar aproximadamente entre el 60 y 100% del total de beneficios de proyectos evaluados en los últimos años. De esta manera, es obvio que errores en la estimación de la rugosidad se traducen en grandes errores en la evaluación y consecuente toma de decisiones.

Sin embargo, los problemas metodológicos no se reducen a medir correctamente esta variable. Las mediciones de rugosidad que se conocen provienen de una gran diversidad de equipos y métodos siendo además interpretadas y utilizadas en ambientes muy diferentes al nuestro. Por otra parte, las relaciones que se utilizan para estimar costos de operación de vehículos y estimar deterioro de pavimentos (MOP, 1982) reflejan, en el mejor de los casos, una adecuada aproximación en el medio donde fueron obtenidas. En los estudios realizados por Soto (1984) y Correa (1984) queda suficientemente claro que dichas relaciones no son adecuadas a nuestra realidad, mostrándose la necesidad ya sea de adaptar dichos métodos u obtener otros provenientes de estudios propios.

En cualquier caso, ya sea para adecuar los últimos estudios disponibles (HDM, 1985) modificando parámetros o coeficientes, o realizar estudios propios en nuestro país resulta indispensable contar con equipos y métodos apropiados para medir la rugosidad en caminos.

En este documento se incluye un informe de avance de un proyecto de investigación acerca del uso y calibración de rugosímetros en caminos nacionales. En el punto 2 se incluye un resumen de conceptos sobre rugosidad y equipos de medición. En el punto 3 se describe un estudio experimental desarrollado para medir rugosidades con dos equipos disponibles en nuestro país. En el punto 4 se entregan los principales resultados obtenidos a la fecha y en el punto 5 las conclusiones y necesidades futuras.

2. Concepto de Rugosidad en Caminos

El concepto de rugosidad y su utilización como parámetro relevante en la descripción de un camino ha tenido una importante evolución en los últimos años. Existen muchas definiciones (tales como Darlington, 1973; Hass y Hudson, 1977; Hudson, 1977; Gómez, 1983) que abordan el concepto desde un punto de vista geométrico de un camino (perfil longitudinal) y/o desde un punto de vista del usuario (confort o agrado de un viaje) donde el vehículo juega también un rol de importancia. Un intento por resolver este problema se hace en Gómez (1983) donde se define la rugosidad estática o geométrica, independiente del instrumento de medida, y rugosidad dinámica que depende del instrumento, equipo o vehículo donde se instala y de la velocidad de medida. Los aparatos de medición geométrica registran un perfil detallado de las variaciones de cada uno de los puntos de la huella, mientras que los de medición dinámica registran las oscilaciones que le produce el perfil superficial (rugosidad estática), cuando son operados a una velocidad constante dada (Gómez, 1983).

Resumiendo las principales características del concepto se puede definir la rugosidad como "las variaciones de la altura de un pavimento a partir de una referencia absolutamente lisa, tal que provoque vibraciones en un vehículo cualquiera a través de su recorrido. Estas variaciones deben ser tales que sus dimensiones generen un desplazamiento vertical relativo entre el chasis y el sistema de suspensión de un vehículo" (Brüning, 1986). Las unidades de medida corresponden al cociente entre unidades de desplazamiento vertical en ambos sentidos del eje horizontal y unidades de longitud; mts/km, mm/km, pulgadas/milla y otras.

La rugosidad en caminos se reconoce como una variable estrechamente ligada con los siguientes factores (Balmer, 1973):

- i) seguridad de los usuarios
- ii) calidad de viaje de los usuarios
- iii) solicitudes sobre el pavimento
- iv) vida útil de los caminos
- v) costos de operación de los vehículos

El número e importancia de estos factores han hecho de este concepto una variable fundamental en el proceso de planificación vial integral.

La variedad de instrumentos disponibles y escalas de medición hizo durante muchos años que las experiencias desarrolladas en diversos países no fuera posible traspasarlas a otros ambientes. Investigadores de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica se reunieron en Brasil en 1982 desarrollando, después de realizar múltiples mediciones en diferentes equipos y tipos de camino, un índice internacional de rugosidad denominado IRI (International Roughness Index). Este índice corresponde entonces a una medida estandarizada de la rugosidad que la relaciona con aquellos valores obtenidos por equipos de medición de diferentes características (Sayers et al, 1985). Debe sí reconocerse que el IRI es un número que resume las cualidades de la rugosidad que tienen un impacto sobre el comportamiento de los vehículos, pero que no es el más apropiado para otras aplicaciones.

Más específicamente, el IRI es apropiado cuando se requiere medir rugosidad para ser relacionada con (Sayers et al, 1985); costos de operación de vehículos, calidad o confort del viaje, cargas dinámicas (daños al camino proveniente de camiones pesados) y condiciones generales de la superficie.

La tecnología desarrollada en torno a la rugosidad en caminos presenta tres aspectos básicos (Balmer, 1973); i) métodos de medición, ii) análisis e interpretación de datos y, iii) aplicación de resultados.

Los resultados de las mediciones de rugosidad se aplican en el análisis de los cinco factores señalados anteriormente, en especial para aquellos que tienen relación con evaluación de inversiones y de conservación vial.

Los equipos o sistemas para medir rugosidad pueden agruparse en cuatro clases genéricas basadas en su facilidad, precisión y calibración para la obtención del IRI (Sayers et al, 1985). Las dos primeras, entregan una medida de la rugosidad estática según la definición de Gómez (1983) o del perfil longitudinal de un camino. Los dos últimos, entregan una medida de la rugosidad dinámica.

- a) Clase 1. Se incluyen los métodos más precisos de mediciones del IRI. El perfil longitudinal de la huella de la rueda se mide como una serie de puntos de elevación precisos espaciados a lo largo del recorrido. Para métodos perfilométricos estáticos la distancia entre puntos debe ser igual o menor a 25 cms. y la precisión en las mediciones de elevación debe ser 0,5 mm. en pavimentos lisos. Se acepta un número menor de mediciones e inferior precisión para caminos rugosos. Actualmente los métodos de mayor precisión son el nivel topográfico y mira y la viga TRRL (Transport and Road Research Laboratory). Existen también perfilómetros láser, que aún están en etapa de estudio con respecto a su validación frente al IRI, y perfilómetros de alta velocidad, que pueden medir el IRI de manera más rápida, sin embargo deben validarse frente al sistema de nivel y mira.

Los métodos clasificados como Clase 1 tienen como principal utilidad servir de validación a otros métodos y/o estudios que requieran una alta precisión.

- b) Clase 2. Incluye otros métodos perfilométricos que permiten un cálculo directo del IRI aún cuando no cumplen los requisitos de precisión de la clase 1. Como medidores de la clase 2 se pueden citar los siguientes instrumentos (Sayers et al, 1985; Balmer, 1973); perfilómetro inercial APL, perfilómetro inercial GMR, perfilómetro CHLOE y perfilómetros de alta velocidad. Los instrumentos de clase 1 y 2 tienen requerimientos de precisión para mediciones perfilométricas del IRI en que, de acuerdo al rango de rugosidad, se define el intervalo entre puntos y la precisión de elevación, ambos en mm.

Finalmente, se ha derivado la rugosidad en caminos pavimentados en nuestro país utilizando las siguientes relaciones (Dirección de Vialidad, 1982):

$$R = 636,62 \sqrt{189,01 \cdot e^{-0,9p}} \quad (\text{pav. rígidos})$$

$$R = 636,62 \sqrt{10^{0,031p^2 - 0,54p + 2,3} - 1} \quad (\text{pav. flexibles})$$

Los datos sobre rugosidad son normalmente utilizados en aplicaciones que varían entre análisis estadísticos, que requieren mediciones de rugosidad sobre diversos tramos de la red vial, y estudios individuales que requieren conocer la rugosidad en sitios específicos. Un ejemplo del primer tipo de aplicación corresponde a un estudio de costos a usuarios en que se utilizan métodos de regresión con información de costos y características viales en muchos tramos. En este caso, errores aleatorios en mediciones individuales causados por poca precisión de los equipos o por características peculiares de los caminos, tenderán a promediarse; sin embargo, errores sistemáticos sesgarán las relaciones de costos obtenidos las cuales no podrán ser usadas en otros ambientes a no ser que se utilice una escala estandarizada (Sayers et al, 1985).

Estudios que tienen relación con planes de seguimiento de deterioro o efectos de políticas de mantención en pavimentos corresponden al segundo tipo señalado. En esos casos, es de interés mantener un registro continuo de pequeños cambios en la rugosidad en sitios específicos. Es indispensable por lo tanto, reducir los errores aleatorios aumentando el nivel de precisión de los equipos. Un sesgo constante en los datos puede incluso ser aceptable si no interesa comparar resultados con otros tramos, o ambientes. Obviamente, el sesgo no debe cambiar con el tiempo. Luego, para ese tipo de aplicaciones debe emplearse procedimientos que minimicen los errores aleatorios maximizando la estabilidad en el tiempo.

Los errores típicos a los cuales debe prestarse atención de acuerdo con la utilización que se le quiera dar a los datos son (Sayers et al, 1985); errores por repetición, que muestran la magnitud de las variaciones que normalmente se producen al repetir una medición en un mismo tramo; errores por calibración, que corresponde a errores sistemáticos en los instrumentos, y errores de reproducción, que corresponden a errores por utilización de diferentes instrumentos o métodos de medición que provocan un ordenamiento de valores de la rugosidad en caminos de manera incorrecta. Instrumentos de Clase 1 y 2 no debieran presentar este tipo de error de manera manifiesta.

3. Mediciones de Rugosidad en Chile

La importancia del concepto de rugosidad en la planificación vial llevó a la Dirección de Vialidad a la necesidad de adquirir un rugosímetro, decidiéndose por un Mays Meter que llegó a Chile a comienzos de 1985. Simultáneamente, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, adquirió un equipo NAASRA, realizándose un convenio de investigación que permitiera utilizar este último equipo en un automóvil Opala Station Wagon de propiedad de la Dirección de Vialidad. Los objetivos específicos de esta investigación fueron:

Clase 3. La mayoría de los rugosímetros tradicionales pertenecen a esta categoría, teniendo todos en común el hecho de entregar resultados dependientes del vehículo. Las características de los vehículos, no sólo son diferentes entre sí, sino también varían con el tiempo, por lo cual una medición obtenida con un instrumento de esta clase debe corregirse a la escala IRI usando una ecuación de calibración obtenida experimentalmente. Esta última, según los cambios producidos en el vehículo, debe recalibrarse. Normalmente, se debe recorrer las pistas de calibración 2 a 3 veces en el año para reformular la ecuación de correlación del IRI y el rugosímetro. Los rugosímetros más utilizados son: Mays Meter, Bump Integrator, BPR (Bureau of Public Roads), PCA Meter (Portland Cement Association) y el NAASRA (National Association of Australian State Roads Authorities). Algunos de ellos se instalan en un equipo propio de arrastre y otros se instalan dentro de un vehículo, normalmente Station Wagon. Dependiendo del tipo de equipo, se plantean diversos requerimientos para los sitios de calibración de un rugosímetro clase 3 (Sayers et al, 1985).

- d) Clase 4. Corresponde a métodos de obtención de rugosidad, básicamente por inspección visual, ratings subjetivos y mediciones no calibradas. Sin embargo, también es conveniente relacionar las medidas a la escala IRI. Existen diversas escalas subjetivas, siendo la más utilizada a la fecha la que relaciona la rugosidad con el Índice de Serviciabilidad.

El Índice de Serviciabilidad, generado por el ensayo vial A.A.S.H.O. (Illinois, EE.UU., 1955-1961), corresponde a una calificación de los usuarios en una escala de 0 a 5 sobre la calidad del servicio e intenta cuantificar el deterioro de una superficie de rodado. A través de sucesivas investigaciones de la A.A.S.H.O. se buscó una relación entre la medida subjetiva (calificación de los usuarios) y una medida objetiva que incorpora parámetros medibles que representan el estado de deterioro de la superficie de la carpeta de rodado. Los parámetros principales corresponden a deformaciones longitudinales, deformaciones transversales, agrietamientos y superficie parchada, a partir de los cuales se dedujeron ecuaciones que derivan el Índice de Serviciabilidad, p (HRB, 1962).

En el año 1975 se realizó en nuestro país un estudio en que por primera vez se intentó medir el índice de serviciabilidad, aplicando los conceptos del ensayo A.A.S.H.O en el camino longitudinal (Ingeniería Andina Ltda.). La falta de recursos y equipos para medir los mismos parámetros, hizo necesario adoptar una serie de supuestos y simplificar fuertemente el ensayo. En particular, se definió 3 variables; C_1 , calificación de la rugosidad en una escala de 1 a 5; C_2 , intensidad de grietas y parches en una escala de 1 a 4 y C_3 , deformación transversal y ahuellamiento en una escala de 1 a 3.

Se realizó ajustes estadísticos tomando valores de p obtenidos de nivelación topográfica y los C_1 de la evaluación subjetiva de los calificadores en las secciones de prueba (personal especialmente entrenado), llegando a las siguientes ecuaciones que han sido intensamente utilizadas en nuestro país:

$$p = 5,8 - 0,8C_1 - 0,5C_2 \quad (\text{pavimentos rígidos})$$

$$p = 5,4 - 0,8C_1 - 0,1C_2 - 0,3C_3 \quad (\text{pavimentos flexibles})$$

Una vez localizado el medidor en su posición, se conecta el cable de transmisión para ubicar el contador frente al operador, preferentemente en la guantera del vehículo.

La longitud del cable accionante flexible debe ser ajustable, permitiendo la conexión cadena-resorte en el punto 0x0 grabado en el armazón del medidor, situación que ocurre una vez que se ha puesto un lastre de 100 kgs. simétricamente a cada lado del instrumento para evitar que se produzcan diferencias en las mediciones generadas por variaciones de peso provenientes de gasto de combustible, herramientas, etc.

3.2. Equipo medidor de rugosidades Mays Meter.

Este medidor, desarrollado por la compañía RAINHART, se presenta en 2 versiones de acuerdo al proceso de instalación. Una de ellas consiste en montar el medidor en el chasis de un vehículo sobre el eje trasero, tal que los resultados de rugosidad resulten dependientes de las características y velocidad del vehículo, y la segunda versión consiste en la instalación del equipo medidor en un trailer con características especificadas, independizándose así del vehículo tractor, pero no de la velocidad de la prueba (Gómez, 1983).

El medidor Mays Meter consiste en dos unidades (ver Fig. 2):

- i) Una barra de metal (2) instalada sobre el eje, sea éste del vehículo o del trailer.
- ii) Un tambor oscilante (1) y un transmisor (3) que captan las diferencias de movimiento vertical bi-direccional, los transforman a movimiento rotativo y lo conducen al contador.

Ambas unidades se vinculan mediante una polea (4) que transmite los movimientos de la barra al tambor, generados por las irregularidades superficiales. Dentro del transmisor va una película codificada (6) solidaria al tambor oscilante, tal que los movimientos rotacionales de este último, son los movimientos de la película. Estos desplazamientos son captados por una serie de 4 fotocélulas (5), ubicadas en la parte superior del transmisor. Los fotosensores generan un impulso eléctrico cada vez que son excitados por movimientos en la barra producto de las irregularidades del pavimento los que son transmitidos por la polea al tambor y de éste a la película como movimiento rotatorio.

Los impulsos eléctricos son conducidos por un cable al contador digital (7), generándose un pulso cada 0,2 pulgadas (5,08 mm.) de movimiento vertical bi-direccional relativo entre el chasis o trailer y el eje,

En el caso del Mays Meter ubicado en un trailer, el proceso de instalación resulta simple, al reducirse a la conexión entre los diferentes cables conductores desde el trailer al vehículo y a la unión con el vehículo tractor.

- i) Aprender a instalar, utilizar y calibrar ambos instrumentos.
- ii) Estudiar la confiabilidad y compatibilidad de ambos equipos.
- iii) Hacer un análisis crítico a la práctica nacional de medir rugosidades a través del índice de serviciabilidad y otras medidas subjetivas a la fecha.
- iv) Analizar la aplicabilidad de los métodos vigentes de estimación de costos de operación de vehículos y modelos de deterioro de pavimentos, a la luz de valores de la rugosidad medidos en caminos nacionales.
- v) Estimación del IRI (International Roughness Index).

En los puntos siguientes se describen las principales características de los equipos utilizados y de diseño de la etapa experimental de mediciones.

3.1. Equipo medidor de rugosidades NAASRA.

Este instrumento actúa mecánicamente y está diseñado para sumar los movimientos verticales en sentido ascendente del chasis del vehículo relativos al eje trasero. Corresponde según clasificación dada en el punto 2 a un equipo de la Clase 3.

El funcionamiento del instrumento es el siguiente (ver Fig. 1). El cable accionante flexible (11) está conectado a la caja del diferencial del eje trasero, en el punto medio entre las ruedas. Como ocurre generalmente que una parte de la caja del diferencial no está localizada centradamente, se coloca un soporte de extensión (6) para mantener la posición central del cable. Este se extiende verticalmente a través de una perforación taladrada en el piso del vehículo e ingresa en el medidor, montado en el chasis. El cable se acopla a una cadena tipo bicicleta (20), la cual pasa sobre una rueda dentada (1) de 19 dientes. De esta manera el movimiento vertical ascendente se transforma en movimiento rotatorio que es conducido por el cable transmisor (7) al contador (15). En el eje (4), donde se encuentra la rueda dentada, existen 2 embragues (9), que impiden la producción de conteos por generación de movimientos verticales descendentes.

El otro extremo de la cadena está conectado a un resorte (8) para permitir la acumulación del movimiento en una trayectoria dada. El resorte está fijo a una chaveta de 2 patas (28) en su extremo inferior.

El contador registra 10 cuentas por cada revolución del eje, cada revolución es equivalente a 152 mm. de movimiento vertical ascendente entre el chasis y el eje.

El aparato se monta en el piso del vehículo exactamente sobre el eje trasero. Para su instalación, se perfora el piso permitiendo así el paso del cable al diferencial y la fijación del aparato medidor al chasis del vehículo. La ubicación de estas perforaciones debe ser tal que coincidan con las perforaciones en la base del instrumento (5) para el paso de los pernos (18).

3.3. Diseño del experimento de mediciones de rugosidad

De acuerdo con los objetivos señalados se diseñó un experimento de mediciones de rugosidad con los equipos Mays Meter y NAASRA que contempló la realización de las siguientes etapas:

- a) Diseño de formulario. Se diseñó un formulario ad-hoc que incluye la especificación del camino, sector, punto de referencia, sentido de tránsito, conductor del vehículo, operador del equipo, presión de neumáticos, número de pasajeros, fecha, hora, condiciones climáticas, más las columnas necesarias para anotar los datos de acuerdo al intervalo de distancia escogido (ver Anexo 1).
- b) Elección de secciones de prueba. El criterio fue elegir secciones de longitud inferior a 5 kms. incluyendo carpetas de rodado de hormigón y asfalto de diferentes edades y grados de deterioro así como caminos no pavimentados de tierra y de ripio. Los puntos inicial y final de cada sección deben corresponder a hitos del camino como letreros, puentes, cambios de carpeta, intersecciones, etc.. En la Tabla 1, se indica el número de secciones de cada tipo.
- c) Selección de los intervalos de medición. Cada sección se subdividió en tramos de medición de 50, 100 ó 200 mts. dependiendo de la homogeneidad superficial del camino. Además debe considerarse la presencia de singularidades (puentes, intersecciones, parches, etc.). Cualquiera sea el intervalo elegido, se eliminan los primeros 50 mts. dado que esta medición es alterada por efecto de la aceleración inicial.
- d) Repetición de las mediciones. En cada sección se planificó una serie de 3 a 5 pasadas, a fin de obtener la rugosidad media y su variabilidad con el objetivo de detectar la sensibilidad del instrumento y la presencia de fenómenos aleatorios.
- e) Efecto de la velocidad. Se seleccionó 9 secciones con características apropiadas - diferentes carpetas y amplitud de rugosidad - a fin de medir los valores de la rugosidad para 3 velocidades, 30, 50 y 70 kms/hora.
- f) Efecto de la presión de neumáticos. Se seleccionó 2 secciones de asfalto y dos de hormigón con diferencias importantes de rugosidad entre sí, a fin de estimar la variación en las mediciones de rugosidad en función de la presión de neumáticos. Los valores considerados fueron la presión normal de los neumáticos del vehículo (26 PSI) y dos valores de más 4 y menos 4 PSI. También se analizó el efecto combinado de la presión de neumáticos y velocidad.
- g) Efecto de sobrecarga. En este caso se seleccionó algunas secciones de prueba en las cuales se midió rugosidad con 2 y 3 pasajeros equivalente a una diferencia de carga de 80 kgs.

- h) Correlación Mays Meter - NAASRA. Se seleccionó 36 secciones de prueba, 24 pavimentadas y 12 no pavimentadas, que cubrieran caminos de diferentes características y rugosidad, a fin de estimar el grado de correlación existente entre ambos instrumentos y validez de sus mediciones.
- i) Relación rugosidad - índice de serviciabilidad. Se seleccionó tramos camineros cercanos a la ciudad de Santiago donde se hubiera hecho mediciones del índice de serviciabilidad en los últimos dos años por parte de consultores de la Dirección de Vialidad, con el fin de medir la rugosidad y verificar las estimaciones que se realizan de acuerdo con las metodologías actuales en nuestro país.

Uno de los aspectos de mayor interés de esta investigación que se encontraba en la estimación del IRI, no ha sido posible realizarla a la fecha hasta no contar con diversas mediciones con nivel y mira en tramos de prueba seleccionados por la Dirección de Vialidad.

4. Resultados

4.1. Recomendaciones de operación

Un conjunto de factores no deseables alteran los resultados que se obtiene al medir rugosidades. Es importante entonces puntualizarlos y señalar algunas recomendaciones que permiten evitarlos (Brüning, 1986):

- i) Odómetro. Su precisión debe ser al menos de un 1% con respecto al valor real de una trayectoria de prueba de dimensiones conocidas siendo conveniente chequear periódicamente el instrumento.
- ii) Instalación de los instrumentos medidores de rugosidad. Debe hacerse un chequeo previo cada vez que se inicia un proceso de mediciones ciñéndose a lo indicado en los manuales de los fabricantes.
- iii) Eliminación de factores de alteración. Debe eliminarse de las mediciones una serie de alteraciones como ser; adelantamientos, frenadas, aceleraciones, cambios de carpeta o entradas/salidas bruscas de puentes, etc.
- iv) Factores operacionales. Influye en los resultados obtenidos, el estado del vehículo (presión de neumáticos, cambios en sistemas de amortiguación, etc.), la trayectoria a seguir en la prueba, la velocidad de operación, la forma de conducir, etc. por lo cual todos estos aspectos deben ser uniformados y especificados al momento de iniciar un proceso de mediciones. El efecto de los factores más importantes se incluyen en los puntos 4.3 al 4.5.
- v) Número de pasadas. Los factores mencionados anteriormente, a pesar de medirse bajo condiciones controladas, influyen en la generación de valores de la rugosidad diferente para distintas pasadas en un mismo tramo. Por esta razón, se recomienda pasar el instrumento un mínimo de dos veces por el mismo tramo, pudiendo aumentar a tres si se detecta una diferencia importante. Los resultados obtenidos con el equipo NAASRA muestran una variación porcentual media en camino pavimentado y no pavimentado de 1,3%

y variación máxima de 3,6%. Con el equipo Mays Meter la variación porcentual media en caminos pavimentados es de 1,0% y máxima de 3,6% para camino de hormigón. En caminos no pavimentados la variación porcentual media fue de un 3,1% y la máxima de un 9,2%.

4.2. Relación Mays Meter - NAASRA

Las relaciones obtenidas entre ambos equipos de medición fueron los siguientes (valores de rugosidad en mm/km):

$$\begin{aligned} (\text{Mays Meter})_{50} &= 1,094 (\text{NAASRA})_{50} - 74,17 \text{ (caminos pavimentados, Fig. 3)} \\ R^2 &= 0,986 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{Mays Meter})_{50} &= 1,320 (\text{NAASRA})_{50} - 2177,8 \text{ (caminos no pavimentados)} \\ R^2 &= 0,91 \end{aligned}$$

El equipo Mays Meter, por su instalación en carro de arrastre, hace que en caminos muy rugosos, especialmente en sectores no pavimentados, a la velocidad de medición de 50 km/hr. entrega valores extremadamente altos de la rugosidad por efectos de vibración propia. Por esta razón, se recomienda pasar el instrumento un mínimo de dos veces por el mismo tramo, debiendo aumentar a tres si se detecta una diferencia importante. Los resultados obtenidos con el equipo NAASRA muestran una variación porcentual media en caminos pavimentados y no pavimentados de 1,3% y variación máxima de 3,6%. Con el equipo Mays Meter la variación porcentual media en caminos pavimentados es de 1,0% y máxima de 3,6% para caminos de hormigón. En caminos no pavimentados la variación porcentual media fue de un 3,1% y la máxima de un 9,2%. Por esta razón, para caminos no pavimentados el nivel de correlación entre ambos es menor que en caminos pavimentados.

4.3. Efecto de la velocidad

Se midió velocidades a 30, 50 y 70 km/hr. presentándose los resultados en forma gráfica en la Fig. 4. La conclusión principal es que para rugosidades bajas, la rugosidad aumenta con la velocidad dándose la situación inversa para rugosidades altas, es decir, a mayor velocidad menor rugosidad.

4.4. Efecto de la presión de neumáticos

En la Tabla 1 se entregan los resultados obtenidos para mediciones de rugosidad con el equipo NAASRA para pavimentos de hormigón y asfalto con presión de neumáticos de 22, 26 y 30 PSI. Las conclusiones que se puede obtener son:

- i) A velocidades altas de medición (70 k/h) se presentan diferencias importantes en la rugosidad entre las presiones extremas (22 y 30 PSI) de un 8% y 13%. Sin embargo, esa diferencia se mantiene para las secciones no rugosas y rugosas.
- ii) A velocidades bajas de medición (30 k/h) tiene una especial importancia el tipo de pavimento y la rugosidad. En asfalto, para la menor rugosidad, se presenta la mayor diferencia entre las presiones extremas (27%)

70 k/h		Rugosidad ¹ (mm/k)			50 k/h		Rugosidad ¹ (mm/k)			30 k/h		Rugosidad ¹ (mm/k)		
Sec.	Pav.	22 PSI	26 PSI ²	30 PSI	Sec.	Pav.	22 PSI	26 PSI ²	30 PSI	Sec.	Pav.	22 PSI	26 PSI ²	30 PSI
1	asfalto	1,262	1,392	1,358	1	asfalto	1,146	1,180	1,302	1	asfalto	934	1,010	1,186
2	asfalto	4,628	4,814	4,990	2	asfalto	4,856	5,100	5,328	2	asfalto	5,210	5,522	5,726
3	hormigón	1,686	1,696	1,906	3	hormigón	1,666	1,676	1,686	3	hormigón	1,524	1,540	1,546
4	hormigón	4,282	4,560	4,838	4	hormigón	4,510	4,974	5,304	4	hormigón	5,294	5,776	6,130

1: Promedio de 3 pasadas por sección

2: Presión normal de neumáticos

TABLA 1: Variación de la rugosidad con la presión de neumáticos y velocidad para caminos pavimentados

ASFALTO	VELOC. (km/hr)		70	50	30	70	50	30	70	50	30
	PRESION (psi)		30			26			22		
	Nº DE PASAJEROS	2	1394	1302	1186	1392	1180	1010	1262	1146	934
		3	1300	1178	912	1274	1086	806	1114	952	704
	disminución porcentual		7,2	10,5	30,0	9,3	8,7	25,3	13,3	20,4	32,7

HORMIGON	VELOC. (km/hr)		70	50	30	70	50	30	70	50	30
	PRESION (psi)		30			26			22		
	Nº DE PASAJEROS	2	1,906	1,686	1,546	1,696	1,676	1,540	1,686	1,666	1,524
		3	1,796	1,514	1,340	1,578	1,470	1,260	1,490	1,334	1,130
	disminución porcentual		6,1	11,4	15,4	7,5	14,0	22,2	13,2	24,9	34,9

TABLA 2: Variación de la rugosidad por efecto de sobrecarga combinada con velocidad y presión de neumáticos

disminuyendo a un 10% en el sector más rugoso. En hormigón, la relación es inversa. La menor diferencia (1,5%) se presenta para el sector menos rugoso y la mayor (16%) para el sector de más rugosidad.

iii) A velocidad de 50 k/h. se presenta en general una situación intermedia con relación al efecto de las velocidades de 70 y 30 k/hr.

La importancia de este efecto combinado es muy fuerte observándose, para un mismo tramo, una diferencia máxima de un 49% y mínima de un 24%.

4.5. Efecto de la sobrecarga

El efecto de la sobrecarga combinado con velocidades y presión de neumáticos se puede ver en la Tabla 2. En todos los casos la sobrecarga hace disminuir de manera significativa la rugosidad. En pavimentos de hormigón a mayor velocidad menor efecto de la sobrecarga y a menor presión mayor efecto de la sobrecarga llegando a alcanzarse un valor del 34,9% de disminución de la rugosidad. Para las condiciones normales de medición del equipo NAASRA (50 km/hr. y 26 PSI) la disminución con el 3er pasajero es de un 14%.

4.6. Mediciones a través del índice de serviciabilidad

4.6.1. Asfalto

En la Figura 5 se grafican los resultados obtenidos de mediciones de rugosidad en caminos de asfalto y se incluye la curva de valores de la rugosidad obtenida a través del índice de serviciabilidad utilizando las ecuaciones presentadas en el punto 2. Los resultados indican una adecuada similitud indicando que la utilización de este concepto es apropiada cuando no se cuenta con equipos de medición. El valor medido para el pavimento de asfalto en mejores condiciones y a velocidad de 50 km/hr., fue de 1.024 mm/km y a través del índice de serviciabilidad se obtiene un valor de 1.064 mm/km. reflejando un adecuado valor mínimo. El valor máximo medido para un asfalto muy deteriorado fue de 5.250 mm/km inferior al máximo que entrega la aplicación del índice de serviciabilidad, de 8.430 mm/km.

4.6.2. Hormigón

La Figura 6 muestra los valores medidos de la rugosidad en diferentes tramos donde se contaba con estimaciones a partir del concepto de índice de serviciabilidad. Los resultados están definitivamente alejados de la realidad indicando que dicho método ha sido mal utilizado en nuestro país para estimar rugosidades. La razón principal parece estar en la no consideración de los sellos de las juntas en este tipo de pavimento lo cual en la práctica hace subir considerablemente la rugosidad. Sin embargo, no es éste el único sesgo dado que la menor medición de rugosidad en un pavimento de hormigón sin juntas fue de 1.676 mm/km. y a través del índice de serviciabilidad dicho pavimento tendría una rugosidad de 1.155 mm/km. Esta diferencia se debe a la calificación dada al parámetro " C_1 ". Cuando el hormigón es reciente, se adapta mejor un valor 1,5 y no 1,0, lo que redundaría en una rugosidad mayor. Las razones para esta aseveración son absolutamente empíricas

y se basan en la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo.

4.7. Valores de la rugosidad en caminos nacionales

La Tabla 3 muestra un resumen de los valores obtenidos en diversas secciones de prueba para pavimentos de hormigón y asfalto de diferentes años de antigüedad y para carpetas no pavimentadas de tierra y ripio.

En pavimentos nuevos de asfalto se midió las menores rugosidades, 1.024 mm/km aumentando hasta 5.250 mm/km para asfaltos deteriorados. En pavimentos de hormigón se observa una mayor variabilidad midiéndose entre 1.676 y 9.322 mm/km.

En carpetas de ripio la rugosidad medida varió entre 9.698 y 16.980 mm/km. En el caso de caminos de tierra la variabilidad observada es mayor midiéndose rugosidades entre 4.463 y 19.558 mm/km.

5. Conclusiones

- i) Con relación a los equipos utilizados, NAASRA y Mays Meter, se ha demostrado la existencia de una alta correlación entre ambos, en especial en caminos pavimentados, por lo cual los resultados obtenidos con cualquiera de ellos resulta apropiado. Debe destacarse, por una parte, que para sectores con muy alta rugosidad (sobre 12000 mm/km) el Mays Meter instalado en carro de arrastre sobrevalora la rugosidad y, por otra parte, que siendo ambos equipos apropiados, el NAASRA tiene a su favor una relación de precios del orden de 1 a 10.
- ii) Las fuertes variaciones encontradas al medir rugosidad frente a condiciones diferentes de velocidad, presión de neumáticos y sobrecarga, junto al efecto también importante de diversos factores operacionales, resalta la necesidad de uniformar criterios normalizando las mediciones de esta variable, como único método de poder interpretar adecuadamente los valores que se obtenga. De otra manera, sólo se habrá gastado una gran cantidad de recursos en adquisición y operación de los equipos sin tener valor sus resultados. Especial importancia adquiere este problema al utilizar los valores medidos para la construcción o validación de modelos de deterioro de pavimentos.
- iii) Las relaciones actualmente utilizadas para obtener la rugosidad en caminos de pavimento de hormigón a partir del índice de serviciabilidad así como los criterios de valores extremos (pavimento nuevo y deteriorado) deben ser revisados a la realidad al presentarse graves distorsiones. En observaciones cualitativas del índice de serviciabilidad hechas por las personas que desarrollaron esta experiencia se determinaron rugosidades inferiores, en promedio, en un 20% con respecto a las medidas con el NAASRA. Las mediciones anteriores eran inferiores entre un 50 y un 350%. Esta diferencia se basa en las apreciaciones de los parámetros " C_1 " y " C_2 " para determinar " p ", el parámetro C_1 no debe ser inferior a 1,5 para hormigones en caminos nacionales. El parámetro " C_2 " debe incluir los sellos bituminosos en las juntas como componentes de grietas, así, por

PAIS	EQUIPO MEDIDOR	PAVIMENTO				NO PAVIMENTADO			
		ASFALTO		HORMIGON		GRAVA		TIERRA	
		RANGO	MEDIA	RANGO	MEDIA	RANGO	MEDIA	RANGO	MEDIA
EE.UU. ¹ California	BPR	821 2,337	1,285	600 2,147	1,010				
BOLIVIA ¹	Mays Meter	231 3,600	1,436			7,000 22,000	13,850	7,600 18,000	11,465
KENYA ¹	BI	1,801 2,918	2,415	1,497 2,697	1,814	2,000 11,000	5,984		
CHILE	NAASRA	1,024 5,250	3,607	1,676 9,322	4,183	9,698 16,980	13,497	4,463 19,558	11,920
CHILE	Mays Meter	1,012 5,200	3,050	1,600 9,000	3,880	15,633 18,469	17,180	7,126 25,840	13,934

¹: PUENTE ... Gómez, 1983

NOTA: Mediciones con Mays Meter en Chile representan una muestra de menos tamaño que con el equipo NAASRA.

TABLA 3: Valores de la rugosidad medidos en diferentes países

ejemplo, un pavimento con sellos cada 7 metros y sin otra alteración (grietas o parches adicionales) tienen un C_2 de 3 a 3,5; si además existen grietas y parches, entonces C_2 va de 3,5 a 4. Para el caso de caminos de asfalto, mientras no se tenga equipos de medición, la metodología actual entrega un adecuado estimador de la rugosidad con excepción del nivel de máximo deterioro.

- iv) Conclusiones definitivas de esta investigación, así como la adecuación de investigaciones realizadas en otros ambientes, sólo serán posibles en la medida que exista una estimación del IRI. El mismo proceso de medición continua de la rugosidad en caminos nacionales, de seguimiento de pavimento y posible desarrollo de estudios propios requiere de métodos de calibración de los equipos a través de secciones de prueba y estimación del IRI.
- v) Superada la etapa anterior deberá procederse a desarrollar normas nacionales orientadas a medir esta variable. En ese momento tendrá sentido plantear la validación o desarrollo de nuevas relaciones de costos de operación de vehículos y de deterioro de pavimentos pudiendo mejorarse significativamente entonces los métodos de evaluación de proyectos viales y toma de decisiones.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración encontrada de parte de la Dirección de Vialidad del M.O.P., en especial del Sub-Director Ingeniero Alberto Bull S. y del personal del Laboratorio de Vialidad.

Referencias

- BALMER, G. (1973) Roughness technology. National Cooperative Highway Research Program Report 86, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- BRUNING, W.H. (1986) Utilización y Calibración de Rugosímetros en Caminos Nacionales. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile (a ser publicado), Santiago.
- CORREA, C. (1984) Funciones de Consumo de Recursos de Vehículos en Caminos Nacionales. Tesis de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- DARLINGTON, J.R. (1973) Evaluation and application study of the G.M. rapid gravel profilometer. Report R-731, Michigan Department of State Highways, Detroit.
- GOMEZ, R.E. (1983) Influencia de las Características Geométricas y Grado de Deterioro de la Vía Sobre la Velocidad y el Consumo de Combustible en Vehículos Carreteros. Tesis de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.

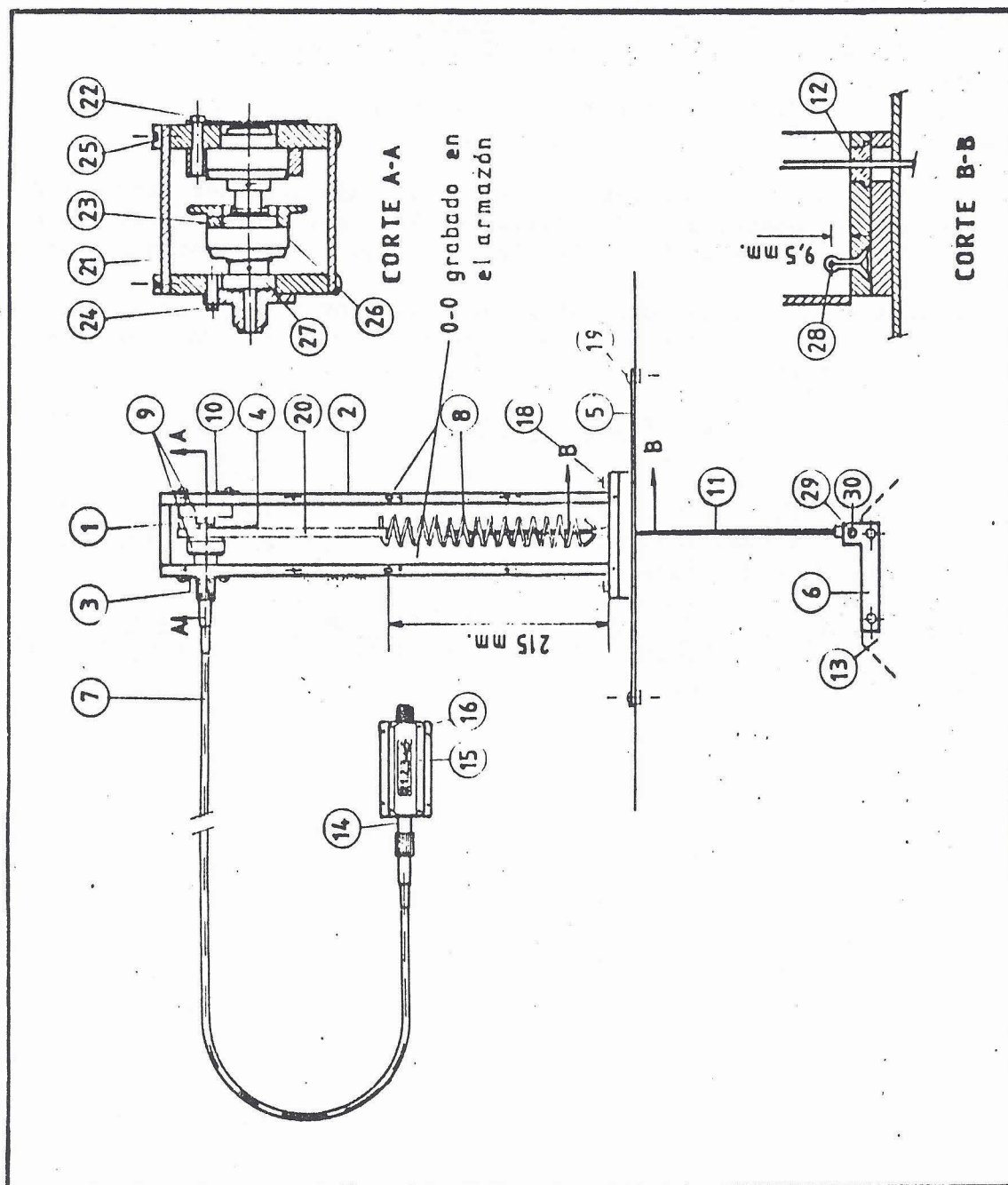


FIGURA 1: Equipo medidor NAAIRA

- H.D.M. (1985) Highway Design Model, Versión 3. The World Bank, Washington, D.C.
- H.R.B. (1962) The AASHO road test. Special Report 61G: Pavement Research. Highway Research Board, Washington, D.C.
- HASS R.C.G. y HUDSON, W.R. (1978) Pavement Management System. Mc Graw-Hill, Nueva York.
- HUDSON, W.R. (1977) Outline of a generalized road roughness index for world-wise use. Paper Submitted to International Bank for Reconstruction and Development. Texas Research and Development Foundation, Austin, Texas.
- INGENIERIA ANDINA LTDA. (1975) Formulación de criterios para la evaluación de pavimentos existentes. Informe Final a Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Santiago.
- M.O.P. (1982) Guía para Evaluar Proyectos Viales. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Santiago.
- SAYERS, M.W., GILLESPIE, T.D. y PATERSON, W.D.O. (1985) Guidelines to conduct and calibration of road roughness measurements. Transport Research Institute, University of Michigan, Ann Harbor.
- SOTO, E. (1984) Funciones de Velocidad y Consumo de Combustible de Vehículos en Caminos Nacionales. Tesis de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.

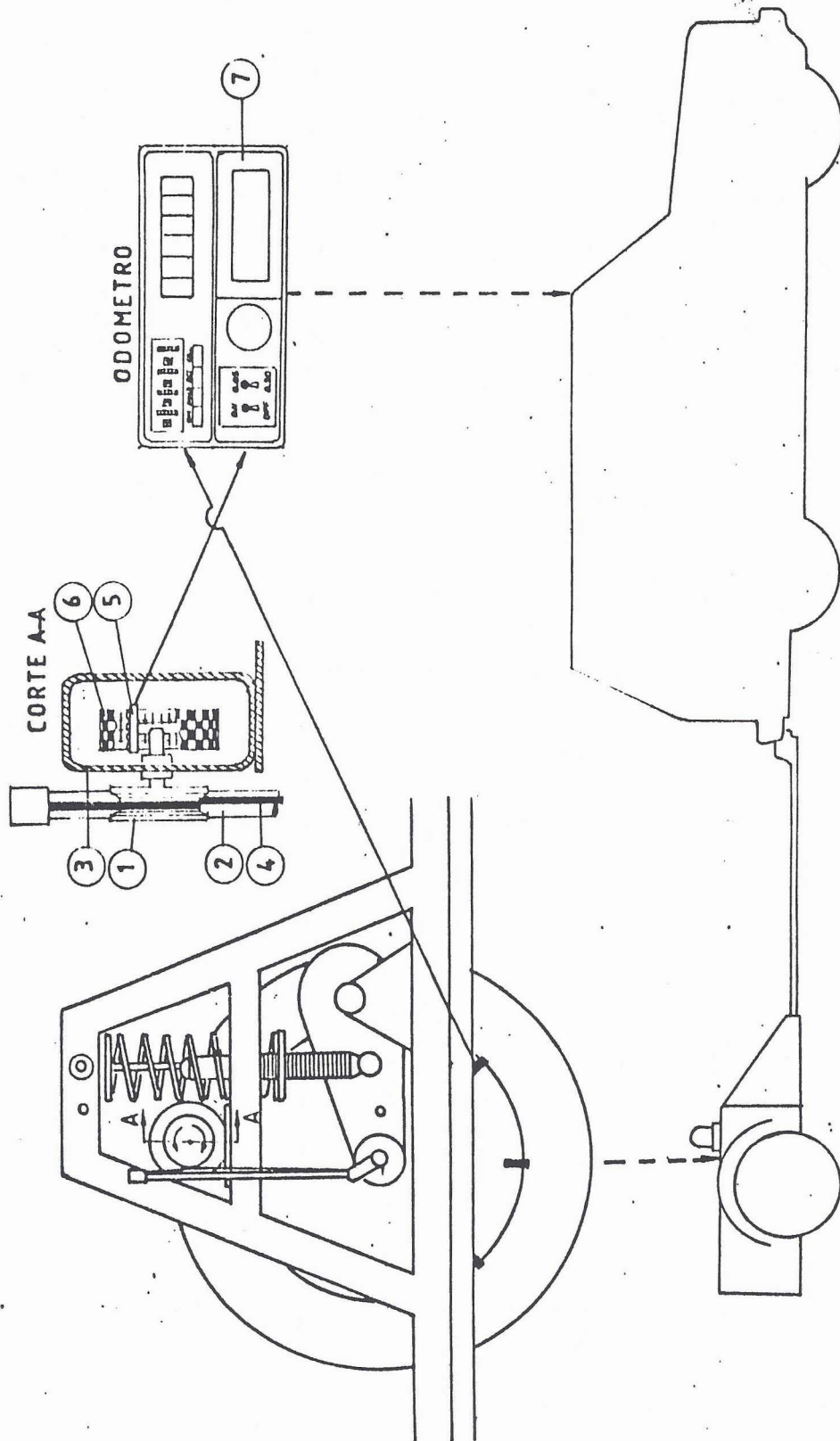


FIGURA 2: Equipo medidor Mays Meter

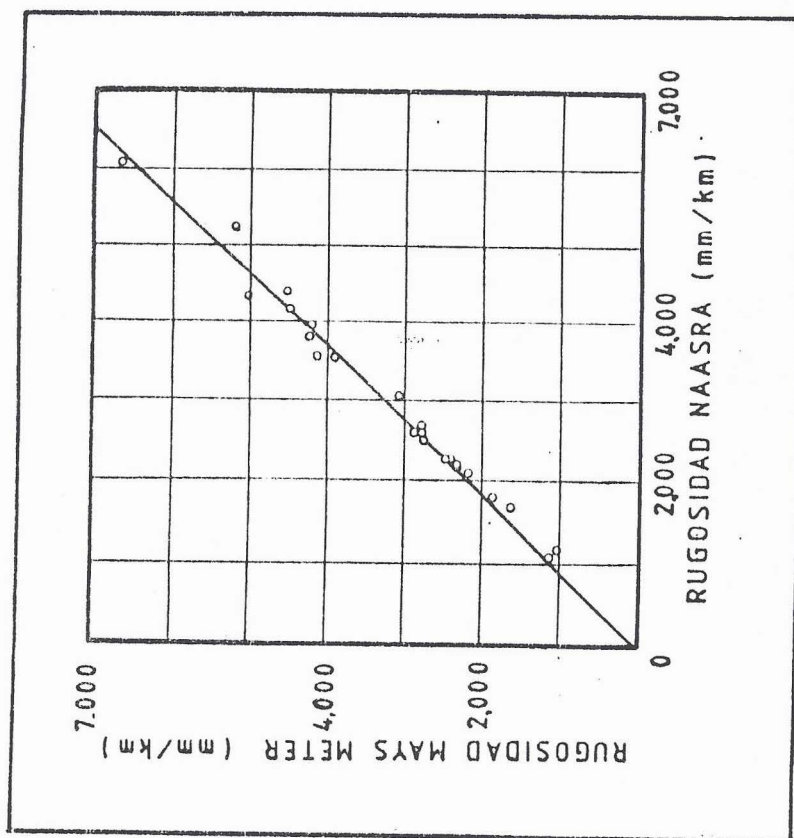


FIGURA 3: Relación Mays Meter - NAASRA para caminos pavimentados

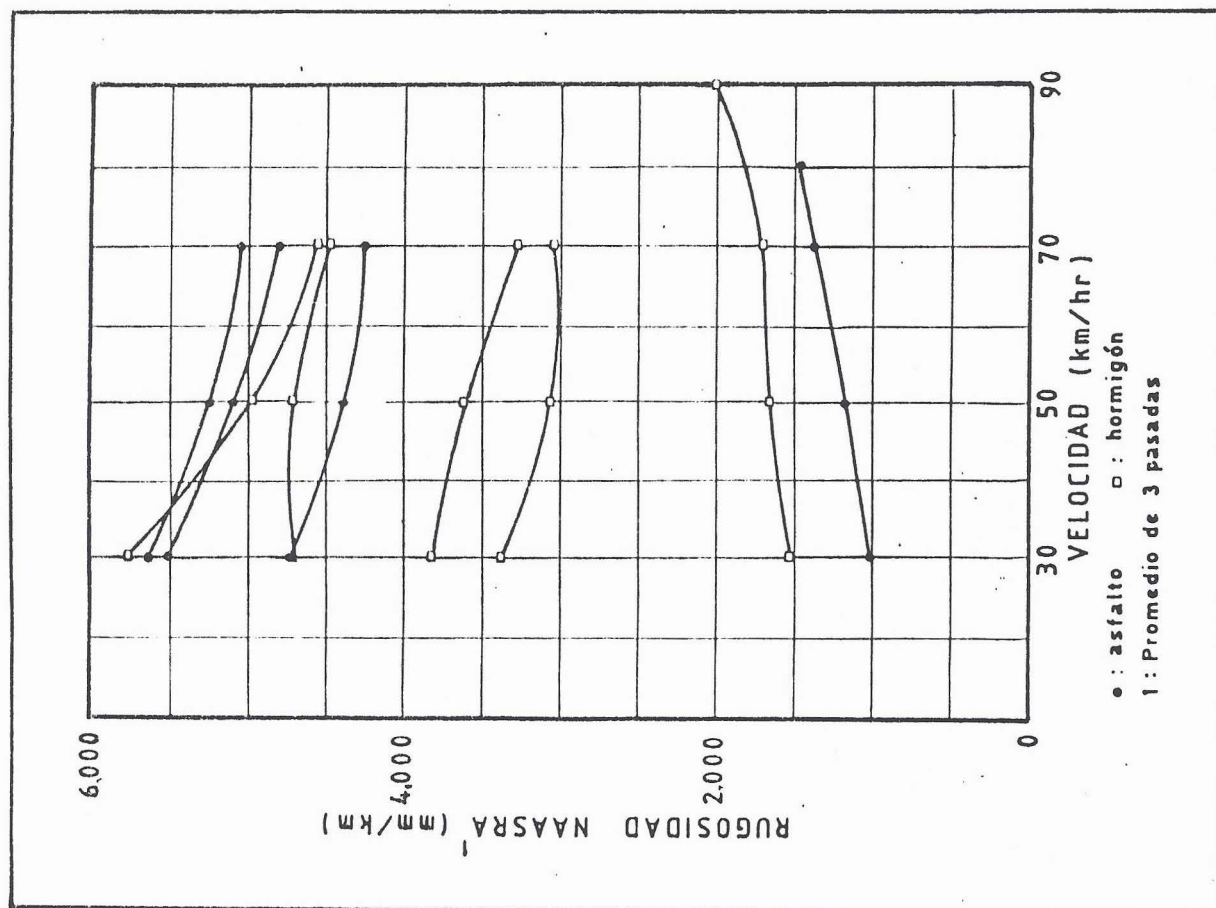


FIGURA 4: Variación de la rugosidad con la velocidad

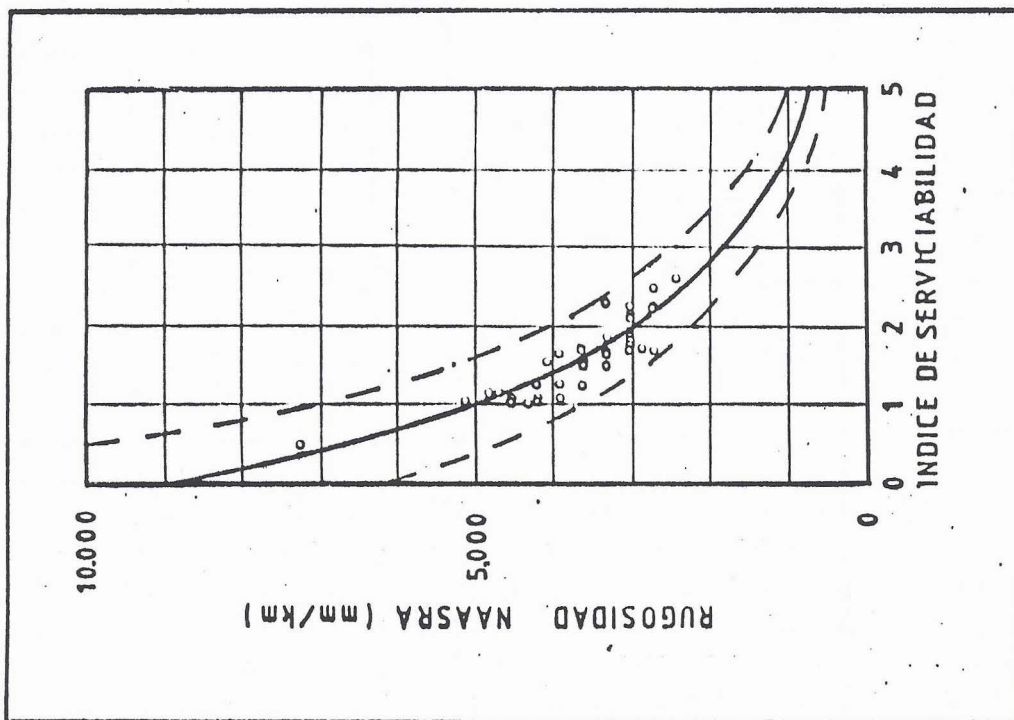


FIGURA 5: Relación rugosidad-índice de serviciabilidad pavimentos de asfalto

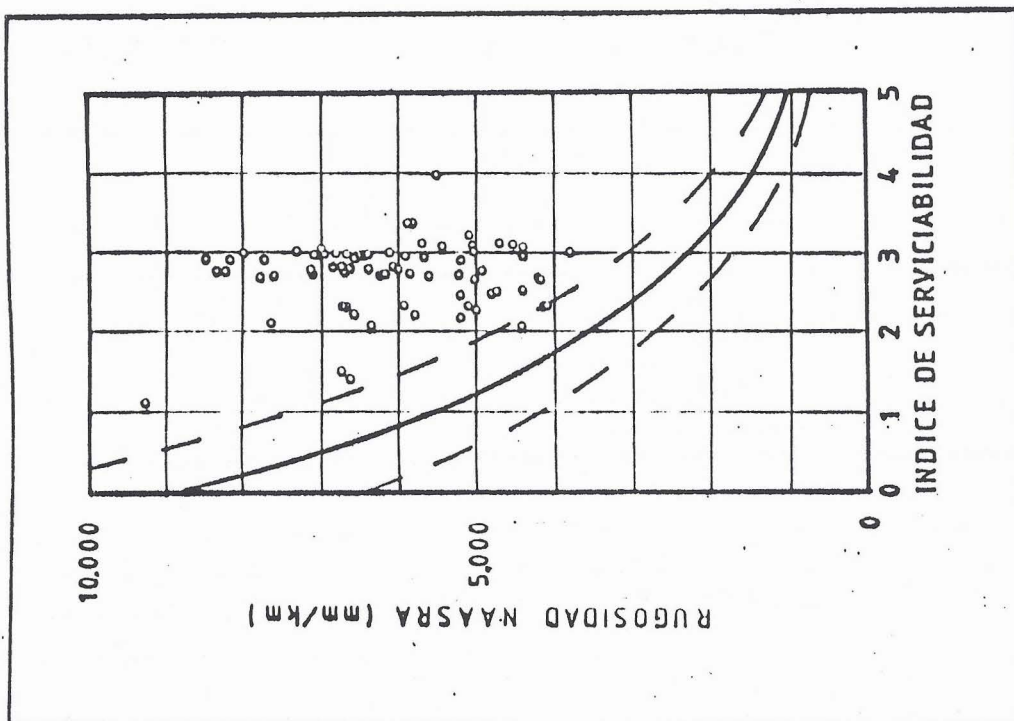


FIGURA 6: Relación rugosidad-índice de serviciabilidad pavimentos de hormigón