

## **Pavimentos - T 067**

### **CONTROL DE CALIDAD DE EQUIPOS Y MEDICIONES DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO**

**Dr. Marcelo BUSTOS \***  
**Ph.D. Hernán DE SOLMINIHAC \*\***  
**Dr. Ing. Tomas ECHAVEGUREN \*\*\***  
**Dr. (c) Ing. Alondra CHAMORRO \*\***

(\*) Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Universidad Nacional de San Juan. Pcia. de San Juan, ARGENTINA.

(\*\*) Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, CHILE.

(\*\*\*) Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería. Concepción, CHILE.

ARGENTINA / CHILE

## RESUMEN

Debido a su incidencia sobre la seguridad en la circulación, la determinación precisa de la resistencia al deslizamiento y la macrotextura en las superficies pavimentadas configura uno de los aspectos más importantes dentro de las actividades propias de la gestión de redes de carreteras.

Para llevar a cabo este tipo de mediciones, existen en la actualidad diversos equipos y procedimientos tales como el Péndulo Británico, GripTester, SCRIM, perfilómetros láser, etc., cada uno de los cuales permite recopilar información en terreno que luego debe ser depurada, procesada, y finalmente estandarizada para poder comparar los resultados respecto a valores umbrales aceptables definidos dentro del proceso de la gestión vial.

No obstante, para poder asegurar un nivel suficientemente aceptable en la calidad y confiabilidad de dichos resultados, se requiere un monitoreo permanente de la secuencia de procedimientos asociados a la ejecución de mediciones, y una evaluación continua del estado general y puesta a punto de los equipos utilizados para ese fin.

En este trabajo se presentan los principales aspectos considerados en un proyecto de investigación desarrollado por la Dirección Nacional de Vialidad y la Pontificia Universidad Católica de Chile, conjuntamente con otras entidades, para proponer una metodología general que puede ser utilizada como mecanismo de control de calidad tanto para mediciones como para equipos.

Dicha metodología está estructurada básicamente a través de planillas o listas de chequeo (checklists), utiliza conceptos estadísticos tales como repetibilidad y reproducibilidad, y ha sido verificada aplicándola en mediciones reales ejecutadas en tramos testigo situados en la zona central de Chile.

**Palabras Clave:** Control de Calidad – Resistencia al Deslizamiento – Medición de Fricción – Reproducibilidad – Repetibilidad – Equipos

## 1. INTRODUCCION

La resistencia al deslizamiento (RD) es una propiedad funcional del pavimento que contribuye a mantener la estabilidad dinámica de los vehículos que circulan por curvas horizontales, y a la provisión de una distancia de frenado adecuada. De ahí que ha sido reconocida como uno de las propiedades más importantes en términos de la seguridad que ofrece un pavimento. Por tal motivo, es un parámetro que continuamente se controla mediante equipos de alto rendimiento tales como SCRIM, GripTester o ASTM Trailer, entre otros. Estos equipos permiten obtener series de datos de RD en grandes extensiones.

Es habitual que los registros de RD obtenidos con estos equipos sean altamente heterogéneos en un sentido espacial, debido a la heterogeneidad de la superficie y a la variabilidad propia del equipo de medición. Así, es posible encontrar series de datos que presentan un patrón espacial irregular, definido en muchos casos por cambios estructurales en la media o en la varianza. Asimismo, si se realizan mediciones repetidas sobre una misma pista, lo más probable es que el equipo no circule exactamente a la misma velocidad y por la misma trayectoria. Esto lleva a que pasadas repetidas arrojen un comportamiento espacial ligeramente distinto. Por tanto el control de calidad de las mediciones cobra especial relevancia, de modo de asegurar que las mediciones realizadas con un cierto equipo constituyan un sistema de medición confiable.

Las principales características que describen la calidad de un sistema de medición cualquiera son la estabilidad estadística, baja variabilidad y poco sesgo. Estas pueden cuantificarse mediante indicadores de exactitud, precisión y estabilidad. Una definición completa de estas propiedades puede verse en Kenett y Zacks (2000).

La Pontificia Universidad Católica de Chile, dentro del marco del Proyecto FONDEF D03I-1042, "Investigación y Desarrollo de Procedimientos para la Medición y Control de Fricción Superficial en Pavimentos en Chile", desarrolló un sistema de control de calidad de equipos y operarios con el objeto de contar con una herramienta concreta orientada al aseguramiento de calidad de las mediciones de resistencia al deslizamiento. El sistema fue desarrollado en conjunto con el Laboratorio Nacional de Vialidad, para en el futuro ser incorporado como un control adicional para la ejecución de mediciones de RD en Chile, teniendo en cuenta que hoy en día se está actualizando la normativa.

El objetivo de este artículo es explicar resumidamente los conceptos, contenidos y alcances de los sistemas desarrollados. Para ello se desarrolla primeramente una breve discusión de los conceptos de repetibilidad y reproducibilidad, los cuales son claves para efectos del sistema de control. Posteriormente, se explica el sistema de acreditación en un sentido general para luego pasar a describir separadamente los sistemas de acreditación de equipos y mediciones.

## **2. REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD**

Lograr calidad en las mediciones de una determinada variable implica, entre otros aspectos, alcanzar un determinado nivel de precisión, la cual se estima mediante indicadores de repetibilidad y reproducibilidad.

Por repetibilidad se entiende la capacidad de un determinado procedimiento de obtener medidas que presenten un nivel reducido de dispersión. Un sistema de medición es repetible si múltiples mediciones realizadas exactamente en el mismo lugar, con el mismo procedimiento y bajo las mismas condiciones resultan estadísticamente equivalentes.

La reproducibilidad, en tanto, está asociada a la varianza entre procesos de medición distintos. Un sistema de medición es reproducible si múltiples mediciones realizadas en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones, pero con diferentes equipos o métodos de medición, son estadísticamente equivalentes (Montgomery, 1991).

Como ejemplo, la determinación de la repetibilidad en la medición de una longitud con una cinta métrica consiste en estimar la varianza que se registra al medir varias veces la misma longitud con la misma cinta; en cambio, la reproducibilidad corresponde a la estimación de la dispersión que se registraría al medir la misma longitud pero con diferentes métodos (cinta métrica metálica, cinta plástica, distanciómetro, odómetro, etc.). Estadísticamente, la forma de determinar dicha dispersión en ambos casos es bastante similar, basada en pruebas del tipo ANOVA (Analysis Of Variance), disponible en la mayoría de los programas computacionales de análisis estadístico.

Dentro del esquema de procesos de acreditación desarrollado en el proyecto de investigación la determinación de la repetibilidad y reproducibilidad forma parte integrante de la estructura de los procedimientos de evaluación de calidad de mediciones y de equipos

propuestos dentro del proyecto. Pero además, dichos conceptos fueron aplicados también en la verificación de la calidad y adecuación de los procesos de evaluación en sí mismos, mediante pruebas en terreno, lo cual permitió ir mejorando sucesivamente los procedimientos hasta alcanzar un resultado final suficientemente homogéneo y coherente, que resultara lo más independiente posible de las particularidades propias de los evaluadores a cargo de la acreditación.

### 3. EL SISTEMA DE ACREDITACION

En el proyecto FONDEF mencionado se desarrolló, a nivel conceptual pero en forma detallada, la estructuración de un Sistema de Acreditación tanto para evaluar metodologías de recolección y posterior procesamiento de datos de resistencia al deslizamiento en terreno, como para evaluar a los equipos o dispositivos mediante los cuales se recopila dicha información, en este caso Péndulo Británico y GripTester (Figura 1). Esta propuesta se realizó principalmente debido a la carencia de un organismo suficientemente reconocido que se dedicara a este tipo de evaluaciones, no sólo en Chile sino incluso a nivel sudamericano, y permitiera acreditar un nivel de calidad aceptable tanto en los procesos de medición como en los equipos propiamente tales.



Péndulo Británico



GripTester

Figura 1. Equipos considerados dentro de los Sistemas de Acreditación

En la actualidad, los procesos de verificación de la calidad de mediciones de resistencia al deslizamiento son llevados a cabo por las mismas organizaciones o empresas que poseen los equipos de auscultación, como parte rutinaria del chequeo previo a la ejecución de mediciones en terreno. Las empresas que fabrican los equipos de medición recomiendan enviar los equipos a sus propios laboratorios con una periodicidad preferentemente anual,

para revisarlos, calibrarlos y certificar su adecuado funcionamiento. Pero el envío desde países latinoamericanos implica un período excesivamente prolongado de traslado y verificación de equipos, durante el cual por lo general los organismos o empresas se quedan sin poder realizar mediciones ya que no disponen habitualmente de equipos alternativos del mismo tipo, y como consecuencia estas organizaciones suelen postergar estas certificaciones por lapsos más allá de lo aconsejable.

Esta demora implica incertidumbre en el nivel de calibración y buen funcionamiento de dichos equipos, y en consecuencia de la confiabilidad de las mediciones registradas con los mismos. Como una alternativa de solución, a través de los Sistemas de Acreditación se propone un esquema conceptual que permita acreditar la calibración y la calidad en las mediciones obtenidas con Péndulo Británico y GripTester, sin necesidad de enviar dichos equipos a sus fábricas de origen, salvo en el caso que aparezcan fallas de funcionamiento que requieran inevitablemente el envío de los equipos a su lugar de origen para ser reparados.

En las siguientes secciones se describen en forma sintetizada las principales características de los Sistemas de Acreditación propuestos, tanto para acreditar calidad en las mediciones como para verificar el nivel de calibración y funcionamiento de los equipos utilizados, indicando también las pruebas adicionales que se efectuaron para revisar y optimizar los procesos evaluativos que integran dichos Sistemas hasta alcanzar resultados satisfactorios.

#### **4. ACREDITACION DE MEDICIONES**

El Sistema de Acreditación de Mediciones de Fricción tiene como principal objetivo establecer un procedimiento sencillo y preciso que permita evaluar y acreditar la calidad de los procedimientos utilizados para la medición en terreno y posterior procesamiento de datos de resistencia al deslizamiento en pavimentos, y los siguientes objetivos secundarios:

- Definir los principales aspectos que deben verificarse en cada procedimiento, y de los diferentes atributos o condiciones a cumplir dentro de cada aspecto.
- Asignar distintos niveles de ponderación a los aspectos y atributos, en relación a la importancia relativa que tengan los mismos sobre la calidad de los procesos.
- Elaborar criterios para realizar la evaluación y asignar una calificación global a la calidad lograda por los procesos bajo evaluación.

- Aplicar los criterios diseñados a la evaluación de operadores y procedimientos concretos, y generar retroalimentación para la mejora progresiva del mecanismo de evaluación.

Para una mejor comprensión de los términos utilizados, se establecen las siguientes definiciones:

- Procesos: son aquellos procedimientos genéricos cuya calidad se pretende evaluar, como la medición de la resistencia al deslizamiento o la calibración del funcionamiento de los equipos.
- Aspectos: corresponden a diferentes etapas globales de los procesos. Por ejemplo, la preparación para medir, el cuidado de los elementos utilizados, y la verificación de condiciones adecuadas de seguridad, son aspectos dentro del proceso de mediciones.
- Atributos: dentro de cada aspecto existe un buen número de “atributos” específicos, que corresponden a cualidades que deben cumplirse. Los atributos pueden ser “críticos” o “no críticos”. Un atributo es crítico cuando su omisión o cumplimiento insatisfactorio puede afectar significativamente la calidad global del aspecto al que pertenece, o bien cuando es esencial para la verificación de atributos posteriores.
- Listas de Chequeo: es el listado de aspectos y atributos que se deben evaluar en cada proceso, específicamente diseñadas para evaluar la calidad lograda para cada uno de ellos.
- Operadores: son las personas encargadas de utilizar y aplicar los instrumentos o equipos para la medición de la resistencia al deslizamiento en terreno, y también son evaluados y calificados como parte del proceso de acreditación.
- Equipos: son los aparatos de medición de resistencia al deslizamiento sometidos a la evaluación, en este caso el Péndulo Británico y el GripTester.
- Evaluadores: son las personas encargadas de inspeccionar y calificar la ejecución de los procesos ejecutados por los operadores, como asimismo de acreditar la calidad de los equipos.

#### **4.1 Estructuración general del Sistema**

El Sistema de Acreditación de Mediciones de Fricción consiste básicamente en la aplicación, por parte de evaluadores independientes, de una serie de listas de chequeo diseñadas para

evaluar a los operadores. El proceso completo se estructura a través de las siguientes fases, tal como queda esquematizado en la Fig. 2:

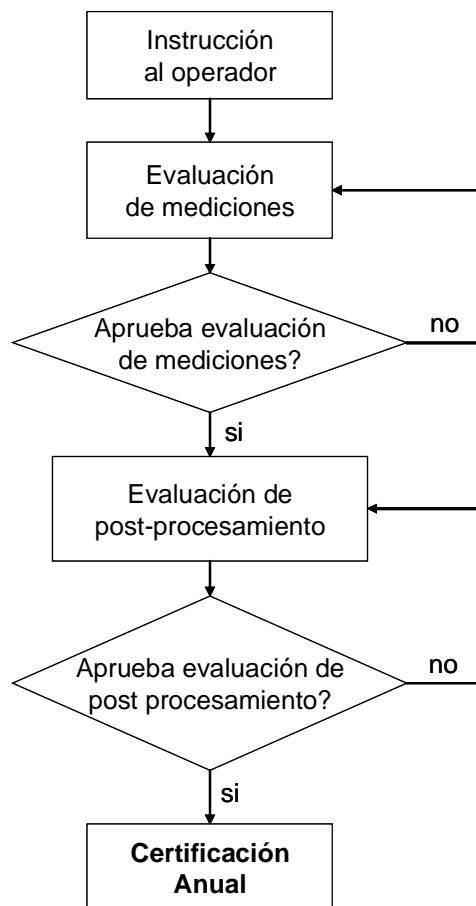


Figura 2. Estructura general del Sistema de Acreditación de Mediciones de Fricción (de Solminihaç et al., 2006)

- a) Fase de instrucción del operador: se entrega al operador la normativa de medición vigente, y se lo pone al tanto de los diferentes lineamientos y criterios de evaluación.
- b) Fase de evaluación de mediciones: las pruebas de medición se desarrollan sobre tramos pavimentados previamente seleccionados. El evaluador debe posteriormente consignar, para cada uno de los atributos incorporados en las listas de chequeo, la calificación que a su criterio merece el operador, siguiendo las pautas establecidas en el Sistema.
- c) Fase de evaluación de post-procesamiento: a partir de los reportes de mediciones entregados por los operadores, el evaluador deberá calificar cada uno de los atributos y aspectos considerados en las correspondientes listas de chequeo.



- d) Fase de calificación global: siguiendo las pautas de cálculo establecidas para la evaluación, cada evaluador deberá entregar una calificación final sobre el grado de calidad alcanzado por el operador en el desarrollo de los procesos.
- e) Fase de certificación: se otorgarán certificaciones a los procesos que hayan sido aprobados en las evaluaciones, acreditando que han alcanzado un nivel aceptable de calidad.

#### **4.2 Metodología de evaluación de procesos**

La evaluación de los operadores se realizará en base a las listas de chequeo, que contienen los principales aspectos y atributos de los procesos de medición. El evaluador debe asignar una calificación a cada uno de estos atributos en forma individual, y posteriormente se aplicará un mecanismo de cálculo que permitirá obtener una nota final, que indicará si el operador fue aprobado y queda por lo tanto acreditado para realizar estas actividades durante un cierto período, o si no alcanzó el nivel mínimo de calidad requerido y debe por lo tanto ser evaluado nuevamente antes de lograr su acreditación.

Las listas de chequeo representan un conjunto de condiciones que deben cumplirse durante la ejecución de los procesos a evaluar. En el caso del Sistema de Acreditación de Mediciones, hay dos tipos principales de listas, aplicados a los equipos GripTester y Péndulo Británico:

##### *a) Listas de chequeo de procedimientos de medición*

Tienen como objetivo evaluar si los operadores se ajustan tanto a la normativa de mediciones como a los procedimientos que establecen los fabricantes para el correcto uso del equipo. Para ello, cada lista consta de tres aspectos principales a evaluar:

- Aspecto 1: Puesta a punto y preparación de los equipos antes de medir
- Aspecto 2: Ejecución y registro de las mediciones propiamente dichas
- Aspecto 3: Precauciones de seguridad adoptadas por los operadores durante el proceso

Cada uno de estos aspectos a su vez está integrado por atributos, tanto “críticos” como “no críticos”. En la evaluación, los atributos críticos tienen mayor peso que los no críticos, es decir que se les da más ponderación en relación a la nota global. Asimismo, los tres aspectos evaluados tienen diferente ponderación al momento de determinar la nota final.

b) *Listas de chequeo de procesamiento de datos*

Están destinadas a evaluar si el operador ejecuta correctamente la secuencia de pasos establecida por norma para procesar y depurar la información registrada en terreno, y finalmente determinar los indicadores representativos (valores medios y desviación estándar) que se deben presentar en los reportes. Se considera un único aspecto para dichas listas, integrado por una sucesión de atributos definidos de acuerdo a la metodología que establece la normativa de medición correspondiente a cada equipo.

Un ejemplo del tipo de listas de chequeo propuestas dentro del Sistema de Acreditación de Mediciones se presenta en la Figura 3, en este caso correspondiente a la evaluación de un determinado aspecto, asignándole calificaciones ficticias a los diferentes atributos incorporados, para describir la manera como se calculan las notas ponderadas.

La acreditación de procesos de medición o procesamiento de datos se realizará una vez que se aprueben las respectivas evaluaciones, para lo cual se deberán cumplir las siguientes condiciones:

- Todos los atributos definidos como “críticos”, deben tener una nota igual o superior a “aceptable” (en este caso, la nota mínima sería 5, en escala del 1 al 7).
- No se podrá tener, para cada aspecto, más de un atributo “no crítico” con calificación inferior a “aceptable”.
- La Nota Final (NF) deberá ser igual o superior a “aceptable” (> 5).

#### **4.3 Verificaciones de calidad en los procesos evaluativos**

Con el objetivo de obtener indicadores generales sobre la calidad de la metodología de evaluación establecida, se realizaron pruebas de terreno en rutas de la Región Metropolitana de Chile, donde distintos evaluadores aplicaron las listas de chequeo previamente elaboradas, para calificar el desempeño mostrado por operadores reales que llevaron a cabo mediciones utilizando los equipos GripTester y Péndulo Británico.

Posteriormente, se realizaron diversos análisis estadísticos sobre los resultados de las evaluaciones efectuadas, tales como los que se mencionan a continuación:

- Análisis de Medias: para evaluar la diferencia relativa entre las medias de las notas finales de los procesos de medición y procesamiento de datos.

- Análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad. Corresponde a un análisis de las calificaciones por aspecto y nota final asignadas por los evaluadores, para estudiar el grado de independencia de las listas respecto del evaluador.


		<b>LISTA DE CHEQUEO Y EVALUACIÓN DE OPERADORES DE EQUIPO GRIP TESTER</b>	
		Acreditación de Mediciones de Fricción	Reporte Nº: _____
Empresa Evaluada: Consultora NNNN	Fecha: 20 /03 /2006	Operador Evaluado: Juan Pérez	Hora de Inicio y Fin: 09 :00 a 13 :00
Evaluador: Juan Fernández	Estado del Tiempo: Soleado		
Ruta Inspeccionada: A005 Sector: Santiago - Talca Km inicial: 10.000 Km final: 10.200 Pista Nº 4 Huella: Externa Nº de serie del aparato: 000001 Observaciones: _____	Croquis de Ubicación del Tramo	Estado Pavimento (Foto): _____	
<b>Aspecto 1: Preparación del equipo antes de las mediciones</b>			
Nº	Atributo a Evaluar	Nota Atributo	Coficiente Atributo CA
1.1	Cargado del tanque de provisión de agua para mediciones y elementos de bombeo	7	0.03449
1.2	Chequeo de logística de provisión de agua según consumos estimados	6	0.03449
1.3	Cargado de estructuras de conexión entre equipo y vehículo de remolque	7	0.06896
1.4	Asegurar funcionamiento del sistema de alimentación para la computadora	7	0.03449
1.5	Llevar las baterías del equipo Grip Tester totalmente cargadas	7	0.06896
1.6	Verificación de estado del neumático de medición, según norma	6	0.06896
1.7	Verificación de la presión de inflado de los neumáticos del equipo	6	0.06896
1.8	Calibración del factor de distancia con odómetro para registro del kilometraje	6	0.06896
1.9	Llevar equipos de comunicación (walkie-talkie) o sistema de radio	7	0.03449
1.10	Verificar limpieza y buen estado general de los equipos de medición	7	0.06896
1.11	Identificación, verificación y balizado del sector a medir	7	0.03449
1.12	Conexión del equipo de medición al vehículo de remolque	7	0.06896
1.13	Conexión de manguera de aprovisionamiento de agua	7	0.06896
1.14	Configuración de computadora siguiendo instrucciones del software	6	0.06896
1.15	Definición de la frecuencia de muestreo del equipo (entre 40, 160, 400 u 800 mm)	7	0.03449
1.16	Definición de la equidistancia de registro de datos (GripLenght), entre 40 mm y 10 m, de acuerdo a lo solicitado por el cliente, o según establezca la normativa	7	0.06896
1.17	Verificación de temperatura del agua entre 5 y 25 °C	6	0.03449
1.18	Verificación del funcionamiento correcto de la descarga de agua	7	0.06897
<b>Nota Ponderada Aspecto 1: <math>S \sum NA_i \times CA_i</math></b>			<b>A1: 6.555</b>

Figura 3. Ejemplo de aplicación de lista de chequeo para evaluar un aspecto específico dentro del proceso de ejecución de mediciones con GripTester (de Solminihac et al., 2006)

- Análisis de Capacidad. Corresponde al estudio de la calidad del servicio prestado. Se realiza a través del estudio del grado de dispersión de los resultados de las listas de revisión, respecto de límites de tolerancia preestablecidos.

Esta clase de análisis corresponde a procesos de aseguramiento de calidad del tipo “Seis Sigma” (Escalante, 2004), de frecuente aplicación en la evaluación de procesos industriales, que fue la metodología acordada dentro del proyecto FONDEF para controlar que las metodologías de evaluación fuesen consistentes y coherentes, y que su aplicación resultara independiente del evaluador.

La aplicación de estas metodologías de autoverificación permitió, a través de sucesivos refinamientos y ajustes de los contenidos y forma de evaluación de las listas de chequeo, alcanzar en todos los casos las tolerancias preestablecidas en el proyecto para cada uno de los indicadores predefinidos, como se indica a continuación:

- *Análisis de medias*: mediante esta técnica estadística se procuró reducir la dispersión entre las notas asignadas por los distintos evaluadores. Tras sucesivos ajustes, se llegó a alcanzar una diferencia relativa entre las medias inferior al 10%, dentro de las tolerancias predefinidas.
- *Análisis de repetibilidad y reproducibilidad*: se analizaron por separado los procesos de medición y los de procesamiento de datos, para lo cual se utilizó el programa de análisis estadístico Minitab<sup>TM</sup>, evaluando hasta el nivel de aspecto dentro de cada proceso. Tanto para Péndulo Británico como para GripTester, se alcanzaron valores de repetibilidad y reproducibilidad normalizadas dentro del rango de tolerancias preestablecidas.
- *Análisis de capacidad*: la capacidad de un proceso es una medida que indica su habilidad de poseer un error inferior a un valor admisible. Depende de la variación del proceso y de los límites de la tolerancia establecidos para el mismo. Escalante (2004) define el índice de capacidad potencial de un proceso (Cp) de la siguiente forma:

$$Cp = (LS - LI) / 6\sigma \quad (1)$$

Donde LS y LI son los límites de la especificación del proceso, y  $\sigma$  es la variación del mismo, representada por su desviación estándar. Es decir, que el índice Cp es la

comparación entre la variabilidad del proceso y su rango de especificación, en un momento determinado. Mientras más alto es este índice, mayor resulta la capacidad del proceso, ya que para límites dados de especificación, ello indica que va disminuyendo su variación intrínseca.

En las pruebas realizadas dentro del proyecto, se obtuvieron finalmente valores de  $C_p$  superiores al mínimo preestablecido como tolerancia, lo cual indica que la metodología evaluativa adoptada posee un bajo nivel de dispersión, es decir, que cumple la premisa de ser independiente respecto del evaluador.

## **5. ACREDITACION DE EQUIPOS**

El Sistema de Acreditación de Equipos de Medición (SAE) está basado en criterios y conceptos similares a los ya aplicados para la acreditación de procesos de medición y posterior procesamiento de datos, con los siguientes objetivos:

- Definir y verificar el conjunto de condiciones que deberán cumplir las pistas o tramos de prueba donde se lleven a cabo estudios de precisión y exactitud en la medición de fricción;
- Evaluar y calificar los procesos de calibración de los equipos a acreditar, mediante listas de chequeo de procedimientos estandarizados de calibración, consistentes con las recomendaciones establecidas por los fabricantes de los equipos;
- Verificar que los indicadores de exactitud y precisión de las mediciones estén dentro de los rangos aceptables;
- Establecer pasos a seguir para aquellos equipos que no alcancen los requisitos mínimos para acreditar la calidad de su funcionamiento.

### **5.1 Metodología general de evaluación en el SAE**

El Sistema de Acreditación de Equipos tiene como principal actividad la aplicación de una serie de listas de chequeo, diseñadas para evaluar y eventualmente acreditar las actividades de calibración y los indicadores de precisión y exactitud alcanzados por los equipos. Sus potenciales usuarios serían aquellas empresas e instituciones propietarias de equipos de medición de resistencia al deslizamiento que deseen acreditar el adecuado funcionamiento de sus equipos para la ejecución de mediciones, tales como empresas consultoras

relacionadas con la gestión vial, universidades y entidades que utilicen estos equipos con fines académicos, y también laboratorios viales estatales y privados.

Las listas de chequeo de procesos de calibración tienen como objetivo evaluar si los equipos son adecuadamente verificados y puestos a punto siguiendo los procedimientos establecidos por los fabricantes. Ello implica la evaluación de diversos aspectos de los procesos de calibración y del análisis de precisión y exactitud. Cada uno de estos aspectos a su vez está integrado por atributos, que pueden ser “críticos” o “no críticos”, tal como se ha definido anteriormente. El evaluador debe asignar una calificación a cada uno de estos atributos en forma individual, y posteriormente se aplica un mecanismo de cálculo considerando factores ponderados, que permite obtener una nota por aspecto, y luego una nota final ponderando las calificaciones obtenidas por aspecto.

Dicha nota indicará si el equipo evaluado fue aprobado y acreditado para desarrollar mediciones en terreno durante un cierto período, cuya duración en principio sería anual, o si no alcanzó el nivel mínimo de calidad requerido y debe por lo tanto ser evaluado nuevamente antes de lograr su acreditación. Dependiendo del tipo de problema detectado, podrá sugerirse su re-calibración, o bien posibles reparaciones, hasta considerar el envío a la fábrica original de juzgarse necesario. El proceso completo de evaluación, cuya estructura se muestra esquemáticamente en la Figura 4, está conformado por las siguientes fases:

- a) Fase de instrucción de los operadores de equipos: consiste en explicar a los operadores en qué consiste el Sistema y cómo se efectúan las evaluaciones. Para la acreditación de equipos, sólo podrán participar operadores previamente acreditados en los procesos evaluados por el Sistema de Acreditación de Mediciones.
- b) Fase de evaluación de procesos de calibración: los evaluadores deberán verificar que los operadores ejecuten correctamente las tareas relacionadas con la calibración de los equipos.
- c) Fase de evaluación de indicadores de precisión y exactitud: una vez ejecutadas las mediciones requeridas en el procedimiento establecido por el SAE, los evaluadores deberán verificar que se cumplen los requisitos mínimos de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), y también de exactitud. Para evaluar la exactitud lograda por las mediciones de un equipo, es necesario definir primero un equipo patrón, al cual se referirán las mediciones realizadas por los otros equipos de este tipo. Se pueden adoptar como equipos “Master” a los equipos que sean propiedad del ente estatal a

cargo de la administración de la red vial, para asegurar un referente reconocido por todos los demás usuarios del SAE.

- d) Fase de acreditación: Se otorgarán acreditaciones a los equipos que hayan sido aprobados en las evaluaciones, acreditando que han logrado alcanzar una calificación mínima para acreditar procesos de calibración e indicadores mínimos de precisión (R&R) y exactitud.

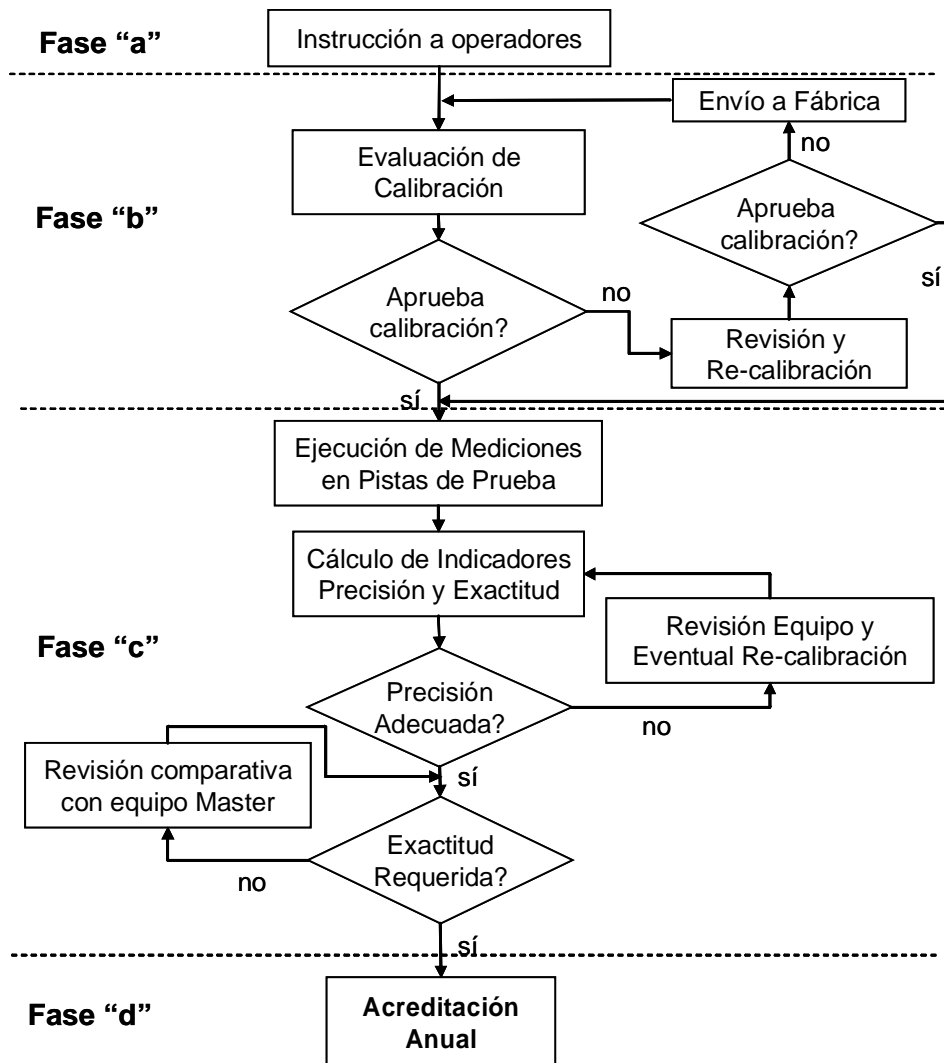


Figura 4. Diagrama de la estructura general del Sistema de Acreditación de Equipos (de Solminihac et al, 2007)

## 5.2 Evaluación de requisitos mediante listas de chequeo

Para el Sistema de Acreditación de Equipos se han confeccionado tres tipos principales de listas de chequeo:

- Lista de chequeo de requisitos a cumplir por las pistas de prueba
- Lista de chequeo de procedimientos de calibración de equipos
- Lista de chequeo de indicadores de precisión y exactitud en las mediciones

a) *Requisitos para las pistas de prueba*

Las mediciones de resistencia al deslizamiento que permiten posteriormente estimar los indicadores estadísticos de precisión y exactitud, deben efectuarse en pistas de prueba pavimentadas, las cuales pueden ser construidas a requerimientos del SAE, o bien utilizarse tramos de carreteras reales como pistas de prueba. A tal efecto, dichas pistas deben cumplir una serie de requisitos generales en cuanto a sus características geométricas, longitud mínima, estado superficial del pavimento, etc. Dichos requisitos serán oportunamente definidos por el SAE, pero deberán considerar algunas recomendaciones básicas:

- Alineamiento rectilíneo y sin curvas horizontales.
- Pendiente longitudinal lo más reducida posible y en ningún caso superior al 4%, para evitar un efecto indeseable en las mediciones.
- Tránsito de vehículos (TMDA) inferior a 1000 veh/día y con menos de 30% de vehículos pesados, si se utilizan pistas de prueba en carreteras reales.
- Visibilidad suficiente y condiciones de seguridad aceptables.
- Niveles de deterioro reducido, para no afectar la calidad de las mediciones.

Todos estos requisitos están definidos en detalle en las listas de chequeo correspondiente. Para alcanzar la categoría de “aceptable”, una pista de prueba debería alcanzar una nota ponderada superior a 6 (o 5,5 en el caso de tratarse de carreteras), en escala de 1 a 7, lo cual demuestra el alto nivel de exigencias requerido para el sitio donde se deberán realizar las mediciones cuya calidad se desea verificar.

b) *Calibración del Péndulo Británico*

La lista de chequeo que permite evaluar los procedimientos de calibración estática para este aparato de medición considera tres aspectos a evaluar:

- Aspecto 1: Verificación mecánica del funcionamiento adecuado de todas las partes del equipo.
- Aspecto 2: Procedimientos establecidos para la calibración del equipo.



- Aspecto 3: Análisis de la repetibilidad alcanzada en las mediciones puntuales.

El primer aspecto considera atributos asociados con chequeos de funcionamiento, estado general e integridad para las distintas partes que componen un Péndulo Británico, tales como tornillos, puntero, zapata de goma, etc. En el segundo aspecto, se incorpora la verificación de atributos directamente relacionados con la calibración (alineamientos, pesos, tensión de resortes, etc.). Finalmente, a través del tercer aspecto se verifica que se alcancen los valores mínimos aceptables de repetibilidad puntual, teniendo en cuenta que se ha establecido que el máximo valor aceptable de desviación estándar de los valores registrados en un mismo punto será igual a 0,89 BPN, para una muestra de 5 mediciones.

#### c) *Calibración del GripTester*

En este caso, la correspondiente lista de chequeo consta de tres aspectos a evaluar:

- Aspecto 1: Procedimientos de chequeo y verificación rápida que se ejecutan previo a la ejecución de la calibración, pero que también suelen efectuarse antes de un procedimiento rutinario de mediciones, verificando el movimiento de sistemas, alineación, sistema de transmisión, neumáticos, y suspensión.
- Aspecto 2: Procesos de chequeo y ajuste del funcionamiento de diferentes partes del equipo, cuya verificación podrá hacerse con una periodicidad preferentemente anual.
- Aspecto 3: Procedimientos principales de calibración (carga vertical, carga horizontal, distancia por revolución DPR, etc.).

Como ejemplo, se presenta en la Fig. 5 una aplicación de la lista de chequeo de atributos correspondientes al primer aspecto evaluado para la calibración del equipo GripTester, con la correspondiente determinación de la nota ponderada calculada para dicho aspecto.

#### d) *Evaluación de precisión y exactitud de mediciones con GripTester*

Se evalúan tres aspectos principales que deberán ser cumplimentados por las mediciones que se realicen con el equipo bajo estudio:

- Evaluación de Repetibilidad: consiste en comparar los conjuntos de datos de medición de resistencia al deslizamiento obtenidos por un mismo equipo GripTester

en dos pasadas sucesivas por una misma pista de medición, para lo cual se calcula el indicador de repetibilidad considerando ambos conjuntos de datos, utilizando el procedimiento estadístico de análisis de varianza (ANOVA). Dicho indicador se divide en el valor más bajo entre los promedios de mediciones para cada conjunto de datos, y el resultado equivale a la repetibilidad normalizada, que debe estar dentro de las tolerancias prefijadas. Se sugiere adoptar el valor 0,15 como máximo aceptable para la repetibilidad normalizada obtenida por tramo para dos pasadas sucesivas.


 <div style="text-align: center;"> <b>LISTA DE CHEQUEO CALIBRACIÓN DEL EQUIPO GRIPTESTER</b> </div>			
Acreditación de Equipos de Medición de Fricción		Reporte N°: _____	Página 1 / 4
Empresa Evaluada: _____		Evaluador: _____	
Operador Evaluado: _____		Fecha: ____/____/____	
<b>Aspecto 1: Verificación expeditiva del equipo antes de ejecutar mediciones (Chequeo FACTS)</b>			
N°	Atributo a Evaluar	Nota Atributo	Coficiente Atributo CA
1.1	Inspección general de limpieza del equipo, sistemas de transmisión aceitados y sin incrustaciones por suciedad o productos químicos usados en las carreteras.	6	0.087
1.2	Verificar que exista suficiente carga en las dos baterías del equipo (mínimo 10 Volts, máximo 12 Volts)	7	0.087
1.3	Verificar libre movimiento de neumáticos de traslación del equipo y de los sistemas de transmisión al colocar el equipo en forma vertical, sin que presenten resistencia perceptible al efectuar una rotación manual de los mismos	6	0.087
1.4	Chequear que exista perpendicularidad entre eje principal y cadena de transmisión utilizando una escuadra	6	0.043
1.5	Boquilla de provisión de agua correctamente alineada al frente de la rueda de medición	7	0.087
1.6	Verificar alineamiento entre sensor de proximidad y engranaje dentado del odómetro	7	0.087
1.7	Verificar que la separación entre sensor de proximidad y engranaje dentado esté siempre entre 0,7 y 0,9 mm, medido con separador metálico de espesor 0,7 mm	5	0.087
1.8	Verificar que la cobertura del sensor no presente daños apreciables	6	0.043
1.9	Al tensar la cadena de transmisión, chequear que la separación entre cadena y guía de rodaje esté entre 17 y 22 mm	6	0.043
1.10	Verificar que la presión de inflado de todos los neumáticos del equipo sea igual a 20±1 psi	7	0.087
1.11	Chequear que los neumáticos no tengan suciedad o grasa en su superficie de rodadura	7	0.087
1.12	Verificar que la profundidad en las ranuras de las ruedas de traslación sea de 2 mm como mínimo; caso contrario deben reemplazarse ambas ruedas	6	0.043
1.13	Verificar que la profundidad en el orificio de control superficial de la rueda de medición sea de 1 mm como mínimo	5	0.087
1.14	Verificar que los amortiguadores de suspensión queden expuestos no más de 3 mm entre su cobertura de nylon y la arandela de tope al balancear suavemente el equipo tomándolo desde la barra delantera	6	0.043
<b>Nota Ponderada Aspecto 1: <math>S \sum NA_i \times CA_i</math></b>			<b>A1: 6.51</b>
<b>Procedimiento de Referencia:</b>			
Findlay Irvine Ltd. (2003) GripTester MK2 D-type. Maintenance Manual, Issue 2. Findlay Irvine Limited, Midlothian, Scotland, U.K. December 2003.			

Figura 5. Ejemplo de aplicación de una lista de chequeo para la calibración de equipo GripTester (de Solminihac et al., 2007)

- Evaluación de Reproducibilidad: en este análisis se determina el mismo indicador estadístico que para la evaluación de repetibilidad, pero en este caso se comparan los conjuntos de datos GN obtenidos por tramo y pasada por diferentes equipos. Se sugiere 0,08 como valor límite de reproducibilidad normalizada para equipos GripTester, de acuerdo a la normativa británica BS7941-2:2000, adoptada como referencia (BSI, 2000).
- Evaluación de Exactitud: se comparan los conjuntos de mediciones obtenidos en una misma pista y número de pasada por el equipo Master y el equipo que se desea acreditar, utilizando los mismos datos analizados para verificar repetibilidad, y utilizando como procedimiento estadístico la comparación de medias (ANOM de un factor), calculando intervalos de confianza para la diferencia de medias de las mediciones realizadas con ambos equipos (Escalante, 2004). Si dentro del intervalo de confianza (IC) de la diferencia de medias queda incluido el valor cero, entonces estadísticamente las medias son equivalentes, y por lo tanto el equipo que se desea acreditar alcanza un nivel de exactitud aceptable, equivalente al del equipo Master.

### **5.3 Condiciones para la acreditación de procesos**

Una vez finalizada la etapa evaluativa, la acreditación de procesos de calibración o de verificación de precisión y exactitud en las mediciones se realizará una vez que se aprueben las respectivas evaluaciones, para lo cual se deberán cumplir las mismas condiciones impuestas en el Sistema de Acreditación de Mediciones, es decir las siguientes:

- Todos los atributos definidos como “críticos”, deben tener una nota igual o superior a “aceptable” (la nota mínima sería 5, en escala del 1 al 7).
- No se podrá tener, para cada aspecto, más de un atributo “no crítico” con calificación inferior a “aceptable”.
- La Nota Final (NF) deberá ser igual o superior a “aceptable” (> 5).

En el caso de no cumplirse los requisitos para aprobar la fase de calibración, en una primera oportunidad se deberá revisar el equipo, verificar que todos sus componentes estén en buen estado desde el punto mecánico y eléctrico, ajustar y corregir lo que fuese necesario, y reemplazar eventuales piezas dañadas. Asimismo, si en la fase de evaluación de precisión y

exactitud los equipos no logran alcanzar rangos aceptables para los indicadores de precisión (R&R), también deberá efectuarse una cuidadosa revisión del equipo. Posteriormente se debe volver a evaluar el proceso de calibración, y si continúan persistiendo problemas que no puedan ser solucionados de otra forma, en última instancia podrá considerarse el envío del equipo a la fábrica original, para que sea sometido a una revisión más exhaustiva.

La falta de precisión también puede deberse a varios factores que no sólo sean inherentes al equipo (mal manejo circunstancial por parte del operador, condiciones climáticas momentáneamente desfavorables, problemas de seguridad durante la operación, etc.), los cuales deberán ser evaluados cuidadosamente en base a las observaciones efectuadas durante la ejecución de mediciones en pistas de prueba. Si el problema se hubiera generado por factores externos al equipo, deberá efectuarse nuevamente la evaluación, cuidando que no se repitan las circunstancias externas desfavorables.

Si un equipo cumple con los requisitos de precisión pero no consigue acreditar su exactitud (comparada con el equipo Master), lo que corresponde es efectuar una revisión exhaustiva del primero comparando el funcionamiento de todos sus procesos y mecanismos internos con los del equipo Master. Esto se hace con el propósito de determinar en dónde puede estar la diferencia que introduzca el sesgo sistemático que impide que ambos equipos presenten resultados estadísticamente similares en sus mediciones.

#### **5.4 Verificaciones de calidad en los procesos evaluativos**

Al igual que en el caso del Sistema de Acreditación de Mediciones, las listas de chequeo propuestas para el Sistema de Acreditación de Equipos debieron atravesar por un proceso de evaluación que permitiese analizar su aplicabilidad y su grado de independencia respecto del evaluador.

Para ello, se llevó a cabo en dependencias del Laboratorio Nacional de Vialidad de Chile un experimento piloto en el cual se ejecutaron los procesos de calibración previstos en las listas de chequeo, aplicado tanto a Péndulo Británico como a GripTester. Posteriormente, se realizaron mediciones en dos tramos preseleccionados de carreteras ubicadas al sur de Santiago de Chile, para determinar indicadores de precisión y exactitud logradas en las mismas, determinando indicadores de repetibilidad, reproducibilidad y exactitud (respecto al

equipo Master, en este último caso), con lo cual se pudieron aplicar las listas de chequeo cuya calidad e independencia respecto de los evaluadores se pretendía analizar.

En dicha ocasión, los evaluadores realizaron la verificación de los requisitos exigidos a las pistas de prueba de acuerdo a la correspondiente lista de chequeo, verificando que ambos tramos cumplieran a cabalidad los requisitos establecidos dentro del SAE.

Contando con los resultados de las evaluaciones, se procesó y analizó dicha información en base a criterios estadísticos, determinando los siguientes indicadores para caracterizar el nivel de calidad alcanzado por los procesos evaluativos:

- Indicadores de capacidad: utilizando los mismos conceptos “Seis Sigma” descritos anteriormente, se calcularon los correspondientes índices Cp para cada lista de chequeo aplicada. Dichos índices resultaron en todos los casos muy superiores a los mínimos establecidos, lo cual demostró claramente que la dispersión de las notas asignadas por los evaluadores resultó muy reducida, indicando la independencia del proceso respecto de los evaluadores.
- Indicadores de reproducibilidad: se utilizó el procedimiento ANOVA de un factor para determinar el valor de la reproducibilidad normalizada. También en todos los casos, dichos valores resultaron dentro de las tolerancias preestablecidas.
- Indicadores de exactitud: por un lado, se desarrolló el análisis de medias (ANOM) de un factor, para comparar estadísticamente los promedios de las notas asignadas por el evaluador considerado como patrón o Master, con las respectivas notas finales asignadas por los otros dos evaluadores. También se calculó la diferencia de medias normalizada (DNM), como la diferencia entre las notas promedio dividida en la nota promedio correspondiente al operador master. Para ambos tipos de indicadores, los valores obtenidos en todos los casos quedaron dentro de las tolerancias preestablecidas en el proyecto.

De esta manera, al lograr que todos los indicadores quedaran dentro de los rangos de tolerancias inicialmente predefinidos, se pudo alcanzar un nivel más que aceptable de calidad y de independencia respecto de los evaluadores, para el proceso evaluativo propuesto para el Sistema de Acreditación de Equipos.

## **6. CONCLUSIONES**

En este trabajo se han presentado las principales características de dos sistemas diseñados para acreditar la calidad de procesos relacionados con la medición de resistencia al deslizamiento en superficies pavimentadas, denominados Sistema de Acreditación de Mediciones y Sistema de Acreditación de Equipos, respectivamente.

Ambos han sido conceptualmente desarrollados como parte del proyecto de investigación y desarrollo FONDEF D03I-1042, llevado a cabo conjuntamente por la Pontificia Universidad Católica de Chile y el Laboratorio Nacional de Vialidad de dicho país.

Los sistemas están basados en la aplicación de listas de chequeo que permiten evaluar y calificar determinados aspectos de los procesos de medición, procesamiento de información, calibración de equipos y calidad de las mediciones entregadas. Mediante la asignación de calificaciones en dichas listas, se puede establecer si los procesos evaluados alcanzan el nivel de calidad suficiente como para ser acreditados. Estos procedimientos están diseñados para ser aplicados en terreno, y para toda la flota de equipos que se requiere acreditar.

Se verificó también la calidad de los procedimientos evaluativos mediante experimentos específicos, determinaron indicadores estadísticos tales como capacidad, repetibilidad, reproducibilidad y exactitud alcanzadas, los cuales quedaron dentro de los márgenes de tolerancias establecidos. Esto demostró que los procesos evaluativos propuestos resultan eficientes e independientes del tipo de evaluador considerado.

Es importante destacar, más allá de las conclusiones positivas, que estos sistemas funcionan en tanto existan normas claras y precisas sobre las metodologías de medición que deben seguirse para cada equipo, y procedimientos establecidos para la operación de los mismos, lo cual hace que exista una referencia concreta y específica sobre la cual pueden basarse los procedimientos de acreditación.

De no contarse con este tipo de normativas, será necesario primero generarlas, y sólo después será factible establecer sistemas de acreditación de calidad de procesos tales como los que se han presentado en este artículo, caso contrario dichos sistemas corren un alto riesgo de fracasar, debido a la carencia de reglamentaciones precisas cuyo cumplimiento sea obligatorio.

## **7. AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean expresar su agradecimiento en primer lugar al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico de CONICYT, Chile, por el financiamiento otorgado durante el desarrollo del proyecto FONDEF D03I-1042. Asimismo, agradecen a la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile, por el apoyo y colaboración proporcionados como institución contraparte a lo largo del proyecto. También desean reconocer el aporte tanto técnico como económico brindado por las empresas concesionarias del grupo CINTRA que integraron el proyecto también en calidad de contrapartes.

## **8. REFERENCIAS**

BSI (2000) Surface friction for pavements – Part 2: Test method for measurement of surface skid resistance using the GripTester braked wheel fixed slip device. British Standards, BS 7941-2:2000. ISBN 0-580-33210-1. UK, September 2000.

De Solminihac, H.; Bustos, M.; Echaveguren, T.; Chamorro, A. (2006) Servicio de Acreditación de Mediciones de Fricción con Péndulo Británico y GripTester: Resultado Final. Proyecto FONDEF D03I-1042, Santiago de Chile, Marzo 2006.

De Solminihac, H.; Bustos, M.; Echaveguren, T.; Chamorro, A. (2006) Resultado 3: Servicio de Acreditación de Equipos GripTester y Péndulo Británico. Proyecto FONDEF D03I-1042, Santiago de Chile, Abril 2007.

Escalante, E. (2004) Sigma-Seis: Metodología y Técnicas. Editorial Limusa, Noriega Editores, México D.F., 2004.

Findlay Irvine Ltd. (2003) GripTester MK2 D-type. Maintenance Manual, Issue 2. Findlay Irvine Limited, Midlothian, Scotland, U.K. December 2003.

Kenett, R. and Zacks, S. (2000). Modern Industrial Statistics, Thompson Learning, Mexico.

Montgomery, D. (1991). Introduction to Statistical Quality Control, Wiley, United States.