

Pavimentos - T 065

ANÁLISIS DE LA OFERTA DE FRICCIÓN EN EL TIEMPO EN VÍAS PAVIMENTADAS DE CHILE

Dr. Ing. Tomas ECHAVEGUREN *
Ph.D. Hernán DE SOLMINIHAC **
Dr. Marcelo BUSTOS ***
Dr. (c) Ing. Alondra CHAMORRO **
y Dr. Ing. Sergio VARGAS - TEJEDA ****

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

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

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

(****) Universidad del Bio Bio, Facultad de Ingeniería. Concepción, CHILE.

ARGENTINA / CHILE

RESUMEN

La fricción es un indicador de la adherencia entre neumático y pavimento. Particularmente, la oferta de fricción se define como la fricción que proporciona el pavimento dada su micro y macro textura, para una condición superficial dada, y una velocidad de circulación determinada. En ingeniería de carreteras, su medición busca proporcionar seguridad a los conductores mediante el control de la macro textura y la resistencia al deslizamiento (RD).

Diversos estudios desarrollados a nivel internacional y también en Chile, muestran que existe una alta variabilidad de la fricción tanto en el espacio como a través del tiempo, en el primer caso dependiendo del trazado geométrico y de las velocidades de operación; y en el segundo caso, en función de la edad del pavimento y del tránsito pesado acumulado. Particularmente, en este artículo se analiza la variabilidad temporal de la fricción a través del estudio de la evolución de la resistencia al deslizamiento.

Para el estudio se realizó un seguimiento de 3 años en tramos testigo de la red vial pavimentada en la zona central de Chile, efectuando mediciones cada 4 meses mediante equipos provistos por el Laboratorio Nacional de Vialidad. Se realizaron mediciones de RD, macro textura, temperatura ambiental y del pavimento, sobre superficies de concreto asfáltico, tratamiento bituminoso y hormigón.

A partir de esta información, se realizó un detallado análisis estadístico que permitió calibrar modelos de tráfico, de evolución de largo plazo y estacional de la resistencia al deslizamiento. En el modelo de tráfico se incorporó el concepto de factor de pulimento equivalente y de oscilación lateral, lo cual mejora la estimación de las solicitaciones sobre la RD y permite obtener modelos más realistas.

En base a los resultados del estudio, se concluyó que los modelos de comportamiento de la RD disponibles actualmente en la literatura sólo son aplicables a carreteras de alto tránsito, por lo cual no resultan de uso práctico para la gestión de toda la red vial pavimentada. Asimismo, se pudo comprobar que existe una variación estacional de la RD que afecta de manera distinta a las superficies asfálticas y de concreto, dependiendo de los niveles de tránsito y condiciones ambientales propias de las carreteras. Esta afección se traduce en comportamientos radicalmente distintos en los primeros años en la vida de un pavimento, resultando más estables en su comportamiento los pavimentos de hormigón.

INTRODUCCION

La adherencia entre neumático y pavimento se caracteriza mediante la Resistencia a Deslizamiento (RD). La RD resulta de la interacción de fuerzas de adhesión, histéresis, visco elásticas y de atracción molecular, las cuales actúan cuando el neumático interacciona con la superficie del pavimento en ambiente húmedo, seco o lubricado.

Diversos estudios han demostrado que valores bajos de RD en pavimentos están relacionados con los accidentes por deslizamiento. Unido a esto, la percepción de los conductores de la RD es prácticamente nula por lo cual es poco probable que logren modificar su velocidad anticipándose a la presencia de secciones de carretera con baja RD. Por este motivo, uno de los objetivos de las agencias viales es mantener los valores de RD lo suficientemente elevados como para minimizar el riesgo de accidentes por deslizamiento.

Uno de los aspectos esenciales para lograr este objetivo es conocer por un lado los factores que afectan la RD, su evolución en el tiempo, y contar con un conocimiento acabado de la red vial pavimentada. Países como el Reino Unido y España y algunas agencias estatales de transporte de Estados Unidos, realizan mediciones periódicas de RD en sus redes viales con el fin de identificar secciones que evidencien baja RD o bien para contar con una base de información suficiente para realizar evaluaciones y estudios científicos.

En Chile, la RD se monitorea periódicamente desde el año 2000 en las carreteras concesionadas, con el fin de controlar el cumplimiento de los umbrales mínimos de RD establecidos en las bases de licitación de los contratos de concesiones. Dicho monitoreo es realizado por el Laboratorio Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile. Algunas sociedades concesionarias también contratan a compañías de auscultación para realizar autocontroles.

Durante el año 2002, en Chile se planteó la necesidad de actualizar la normativa vigente relativa a la gestión de la resistencia al deslizamiento. Dicha necesidad, se materializó entre los años 2005 y 2008, a través de un proyecto de investigación financiado por el Gobierno de Chile, y desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile, en conjunto con el Laboratorio Nacional de Vialidad y algunas Sociedades Concesionarias.

El objetivo de ese proyecto fue el desarrollar una base de conocimiento suficiente para actualizar y desarrollar procedimientos de medición, armonización, definición de umbrales y control de calidad de equipos de medición de RD. Dicha base de conocimiento, se desarrolló sobre la base de un extenso plan de mediciones de RD en la red vial pavimentada, la cual fue desarrollada con el apoyo del Laboratorio Nacional de Vialidad, quienes pusieron a disposición del proyecto el equipo SCRIM. Dicho proyecto, y el plan de mediciones en particular, fue el primer proyecto a gran escala de estudio de la RD en Sudamérica y uno de los más importantes del mundo.

Objetivos y Metodología de Trabajo

En este trabajo, se presentan los principales resultados del estudio y modelación de la RD realizada en base al programa de mediciones implementado en el proyecto citado. Estos resultados se tradujeron en modelos de comportamiento de la resistencia al deslizamiento que consideran sus variaciones estacionales y de largo plazo, así como la estandarización del proceso de mediciones con el equipo SCRIM.

La metodología de trabajo empleada en el estudio y que se presenta en este trabajo, está constituida por 4 etapas: Diseño Experimental, Ejecución de Mediciones, Análisis Exploratorio de Datos y Modelación de Comportamiento de la RD.

El diseño experimental consideró la identificación de las variables relevantes para la modelación y análisis, para diseñar el método de muestreo y dimensionar el tamaño muestral y por consiguiente el número de tramos de medición a considerar en el estudio. El tamaño muestral se determinó utilizando análisis de potencia de acuerdo al método de Cohen (1988). Se recolectaron bases de datos existentes de inventario, resistencia al deslizamiento y macro textura, con el fin de contar con una visión preliminar del estado de la red vial pavimentada.

La ejecución de mediciones consideró un proceso de identificación y validación en terreno de los tramos de medición basado en el método de muestreo de ventanas (Videla et al, 1996) y de una etapa de medición preliminar con el fin de desarrollar previamente una metodología estandarizada de medición. Dicha metodología, se explica en extenso en Echaveguren et al (2009). Posteriormente se realizaron las mediciones y se realizó el pre-procesamiento de acuerdo a la metodología ya citada.

El análisis exploratorio de datos consistió en aplicar análisis estadístico a los datos, con el fin de identificar tendencias del comportamiento general de la resistencia al deslizamiento y verificar las hipótesis bajo las cuales se diseñó el plan de muestreo. Esto es, probar la hipótesis de ergodicidad débil subyacente al método de muestreo de ventanas.

La modelación de comportamiento consideró la elaboración de un modelo generalizado absoluto de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento, acoplado con su comportamiento estacional. Para ello se desarrollaron una serie de sub modelos que, integrados, formaron el modelo principal. Los modelos fueron calibrados aplicando regresión no lineal robusta, con la ayuda de programas computacionales estadísticos.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental tiene por objetivo el identificar las variables explicativas y sus interacciones, además de determinar el tamaño muestral requerido, el cual se traduce posteriormente en la definición de localización y características de los tramos de medición. Las variables explicativas fueron identificadas en base a una revisión exhaustiva del estado del arte sobre modelación de comportamiento de resistencia al deslizamiento, desarrollada previamente por de Solminihac et al (2006).

De acuerdo a dicho estudio, se seleccionó como variable dependiente la resistencia al deslizamiento y como variables explicativas, el tipo de superficie, la macro textura, la edad del pavimento respecto de la última intervención, el nivel de tráfico en los últimos seis años, y el clima, caracterizado como regiones geográficas seca y húmeda. La resistencia al deslizamiento y macro textura fueron medidas en terreno. El resto de variables fueron obtenidas del inventario vial y plan nacional de censos, ambos provenientes del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Dichas variables fueron organizadas en una matriz factorial para definir preliminarmente los niveles de categorización de las variables antes mencionadas. Una vez que se realizaron las mediciones y se obtuvieron los datos fue necesario realizar una reorganización de los extremos de los niveles de categorización de variables para lo cual se aplicó el análisis de conglomerados de k-medias y el dendrograma.

En la Tabla 1 se muestra la matriz factorial utilizada para la modelación de comportamiento tendencial de la resistencia al deslizamiento y en la Tabla 2, la matriz factorial correspondiente a la modelación de comportamiento estacional de la resistencia al deslizamiento.

Tabla 1: Matriz Factorial para modelación de comportamiento tendencial de Resistencia al deslizamiento (Echaveguren, 2008).

Tipo de Superficie	Zona Climática	Niveles de Tráfico Equivalente Acumulado								
		Bajo			Medio			Alto		
		Edad del Pavimento (años)								
		1 - 4	5 - 10	11-20	1 - 4	5 - 10	11-20	1 - 4	5 - 10	11-20
Concreto Asfáltico	Húmedo									
	Seco									
Tratamiento Superficial	Húmedo									
	Seco									
Hormigón	Húmedo									
	Seco									

Tabla 2: Matriz Factorial para modelación de comportamiento estacional de Resistencia al deslizamiento (Echaveguren, 2008).

Tipo de Superficie	Zona Climática	Niveles de Tráfico Equivalente Acumulado											
		Bajo				Medio				Alto			
		Estación del Año											
		P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I
Concreto Asfáltico	Húmedo												
	Seco												
Tratamiento Superficial	Húmedo												
	Seco												
Hormigón	Húmedo												
	Seco												

P: Primavera; V: Verano; O: Otoño; I: Invierno

Tamaño Muestral

El tamaño muestral se calculó mediante análisis de potencia estadística, para modelos lineales generalizado. Para ello se empleó el software GPower, el cual incluye los métodos de desarrollados por Cohen (1988) (Erdfelder et al, 1996). Para el cálculo se consideraron dos criterios: un efecto tamaño de nivel medio y una alta potencia estadística. EL primero

permite controlar el efecto de inflación de varianza y la diferencia entre la correlación de la muestra y de la población. El segundo permite controlar los errores tipo I y II. Aplicando estos criterios se obtuvo un tamaño muestral por celda de las Tablas 1 y 2 de 55 secciones de medición. Se estableció que cada sección de medición tuviera una longitud de 200 m, con lo cual se aseguró la obtención de un máximo de 40 datos de resistencia al deslizamiento por cada sección. Estadísticamente, este número de datos es suficiente para verificar la condición de homogeneidad de la sección y el cálculo de la media y desviación estándar de la resistencia al deslizamiento.

Método de Muestreo

El método de muestreo se fundamentó en la experiencia en muestreos similares de Videla et al (1996), para calibrar modelos de deterioro de IRI en Chile. Formalmente, constituye un muestreo por ventanas de realizaciones de un proceso estocástico que determina a nivel de red el comportamiento de la resistencia al deslizamiento. Para ellos asume que para ciertos niveles de edad del pavimento, nivel de tráfico y ambientales es posible definir grupos de secciones de medición que son representaciones del proceso de deterioro a nivel de red de la resistencia al deslizamiento. Esto implica que no existe correlación cruzada entre secciones de distintas edades, por ejemplo. Para ensamblar las secciones de medición en uno solo proceso, es preciso verificar la hipótesis de ergodicidad débil (Echaveguren, 2008). Si esta se verifica, entonces los grupos de secciones de ensayo distribuidos en diferentes niveles de edad, pertenecen al mismo proceso.

Identificación de Secciones de Medición

La identificación, clasificación, localización y especificación de atributos de las secciones de medición se realizó utilizando el inventario vial del MOP de Chile, las matrices factoriales descritas en Tabla 1 y 2 y examen en terreno de cada una de ellas. Se realizó una selección preliminar teniendo en consideración la condición del pavimento, la localización de las secciones respecto de los campamentos base, condiciones climáticas y de tráfico y edad del pavimento. Posteriormente se verificó en terreno cada una de estas condiciones además de aspectos de seguridad para ejecutar las mediciones y el grado de interacción con la propiedad adyacente. El resultado de este análisis se refleja en el número de secciones de medición obtenidas para cada atributo considerado para caracterizar la resistencia a la RD, como se muestra en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3: Secciones de medición consideradas para la modelación tendencial de la resistencia al deslizamiento (Echaveguren, 2008).

Tipo de Superficie	Zona Climática	Niveles de Tráfico Equivalente Acumulado								
		Bajo			Medio			Alto		
		Edad del Pavimento (años)								
		1 - 4	5 - 10	11-20	1 - 4	5 - 10	11-20	1 - 4	5 - 10	11-20
Concreto Asfáltico	Húmedo	37	54	78	64	64	91	30	80	81
	Seco	76	64	30	0	159	70	81	64	129
Tratamiento Superficial	Húmedo	71	144	77	32	42	77	0	0	0
	Seco	31	112	68	0	114	146	0	33	13
Hormigón	Húmedo	0	0	26	0	0	45	0	0	103
	Seco	0	0	0	0	0	77	0	18	108

Tabla 4: Secciones de medición consideradas para la modelación estacional de la resistencia al deslizamiento (Echaveguren, 2008)

Tipo de Superficie	Zona Climática	Niveles de Tráfico Equivalente Acumulado											
		Bajo				Medio				Alto			
		Estación del Año											
		P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I
Concreto Asfáltico	Húmedo	34	34	34	34	47	47	47	47	33	33	33	33
	Seco	10	10	10	10	66	66	66	66	80	80	80	80
Tratamiento Superficial	Húmedo	20	20	20	20	15	15	15	15	0	0	0	0
	Seco	59	59	59	59	61	61	61	61	0	0	0	0
Hormigón	Húmedo	17	17	17	17	20	20	20	20	0	0	0	0
	Seco	0	0	0	0	24	24	24	24	15	15	15	15

Diversas celdas de las matrices factoriales no pudieron ser llenadas con tamaños muestrales requeridos dado que no se identificaron en terreno secciones de medición adecuadas. Por ejemplo, los caminos pavimentados con tratamientos superficiales corresponden esencialmente a caminos secundarios en donde el tráfico es bajo o medio. Asimismo, en Chile se ha sustituido progresivamente el hormigón por el asfalto como material para la pavimentación, por lo cual no se encontraron secciones de edades bajas. Por otro lado, pavimentos de hormigón de edades muy altas, exhibían niveles de deterioro muy altos, caso en el cual los equipos de medición podían resultar deteriorados si se les utilizaba en dichos tramos. El resultado final fue 2 matrices factoriales (Tablas 3 y 4) no balanceadas e incompletas, lo que obligó a utilizar modelos lineales generalizados robustos (GLM) para realizar el análisis de varianza.

RECOLECCION Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos fueron recolectados entre los años 2005 y 2007. La resistencia al deslizamiento se midió mediante el equipo SCRIM y la macro textura con Perfilómetro Laser. Ambas clases de datos fueron tomada cada 5 m. El procedimiento de medición utilizado fue el desarrollado por De Solminihac et al (2007). De este modo, las principales tareas ejecutadas fueron las siguientes:

- a) Calibración y evaluación de repetibilidad de equipos de medición
- b) Detección de datos no válidos y anómalos
- c) Normalización de valores de resistencia al deslizamiento a una velocidad de medición de 50 Km/h y a una temperatura de referencia de 20°C de acuerdo al método recomendado por Echaveguren (2008).
- d) Análisis de cambios estructurales en la media y la varianza de datos de resistencia al deslizamiento y macro textura de acuerdo a la metodología de segmentación de Vargas et al (2008).
- e) Superposición de segmentación calculada en d) sobre segmentación sistemática de unidades de muestreo.
- f) Asignación de media y varianza a sección de medición de acuerdo a los resultados de los pasos d) y e).

Análisis Exploratorio de los Datos

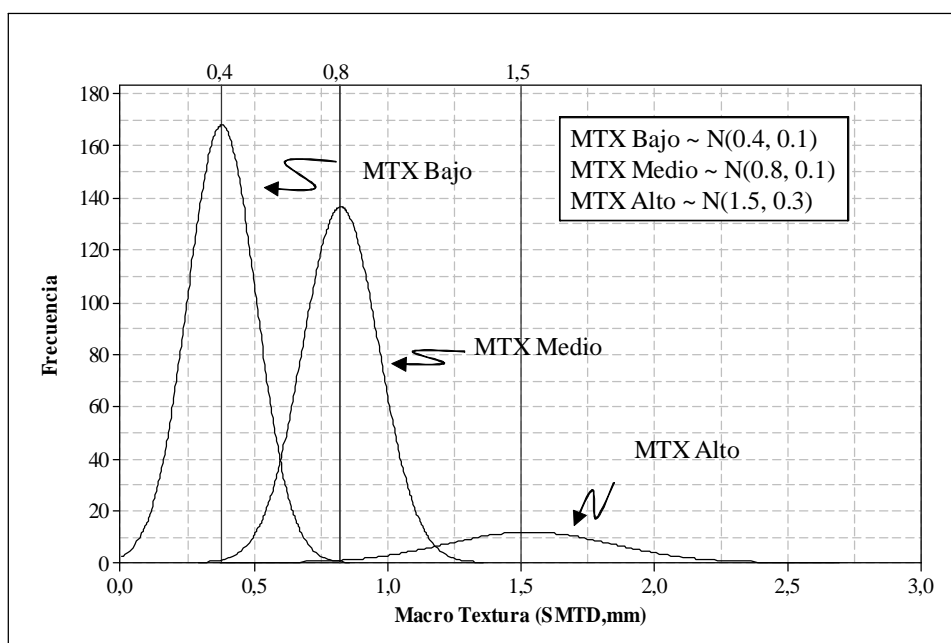
Este análisis tuvo por objetivo conocer las tendencias generales del comportamiento de la resistencia al deslizamiento y macro textura en la red vial pavimentada de Chile. El análisis consideró el cálculo de la estadística descriptiva, pruebas de bondad de ajuste para identificar distribuciones de probabilidad, análisis de conglomerados, análisis en base a diagramas de caja y análisis de varianza. El análisis completo fue desarrollado mediante el software MINITAB 14.2.

Análisis de la Macro Textura

Los datos de Macro Textura se agruparon en conglomerados mediante el método de las k-medias. Los conglomerados consideraron 3 niveles: alto, medio y bajo. Posteriormente cada dato individual fue asignado a cada uno de los niveles. Se realizó una prueba de bondad de ajuste para verificar la normalidad de los datos mediante el método de Jarque – Bera (1987), implementado por Lawford (2005). La prueba se realizó en forma independiente a los datos asociados a cada nivel de Macro Textura. Los resultados obtenidos mostraron que en los 3 niveles los datos de Macro Textura siguen una distribución de probabilidades normal.

La Figura 1 muestra que los valores medios de Macro Textura medidos varían entre 0,4 y 1,5 mm (expresados en unidades SMTD (*sensor mean texture depth*)), siendo el mínimo valor de 0,2 mm y el mayor de 2,6 mm. Los valores bajos de Macro Textura están asociados en generalmente a mezclas asfálticas muy cerradas. Asimismo, en tratamientos superficiales con agregados muy pulidos o no chancados o tratamientos superficiales con los agregados cubiertos por una delgada capa asfáltica es posible encontrar valores de macro textura entre 0,3 y 0,7 mm.

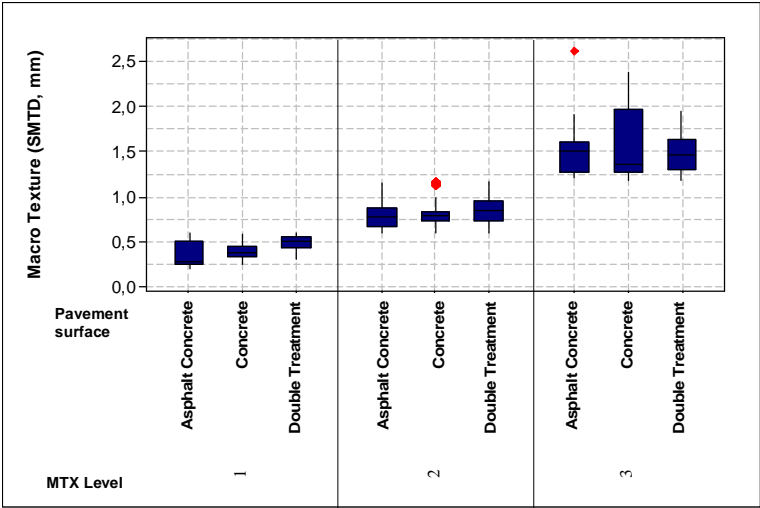
Figura 1: Resumen de estadística descriptiva de datos de macro textura.



El diagrama de caja de la Figura 2 muestra que los tratamientos superficiales poseen una macro textura media ligeramente más elevada que el resto de tipos de superficie en los tres

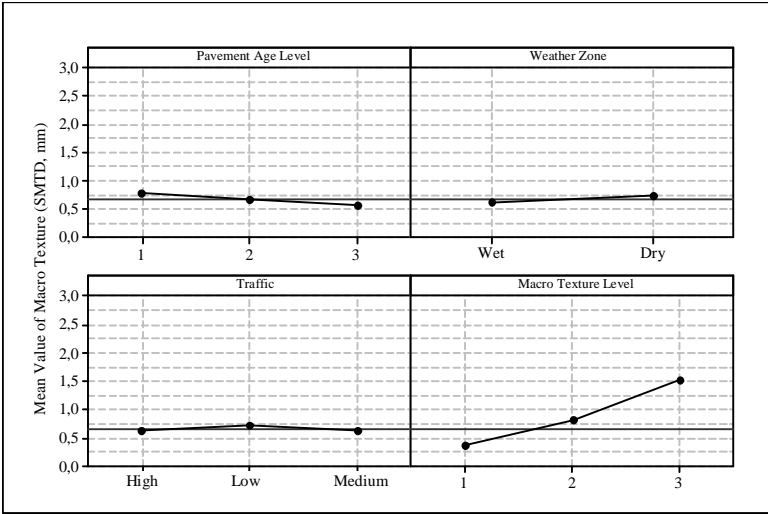
niveles de macro textura. Sin embargo ese comportamiento no constituye una regla general, dado que las diferencias son inferiores a 0,3 mm.

Figura 2: Diagrama de caja de niveles alto, medio y bajo de Macro Textura respecto del tipo de pavimento



Posteriormente se realizó un análisis del efecto de la edad del pavimento, zona climática y tráfico sobre la Macro Textura. El objetivo esencial fue determinar si dicha variable poseía algún grado de dependencia de tales factores y visualizar así la necesidad de excluirla o no como variable explicativa en la modelación. La Figura 3 resume el análisis.

Figura 3: Resumen gráfico del análisis de factores sobre la Macro Textura.



En ella se observa que el tráfico, zona climática y edad del pavimento no afectan la gran

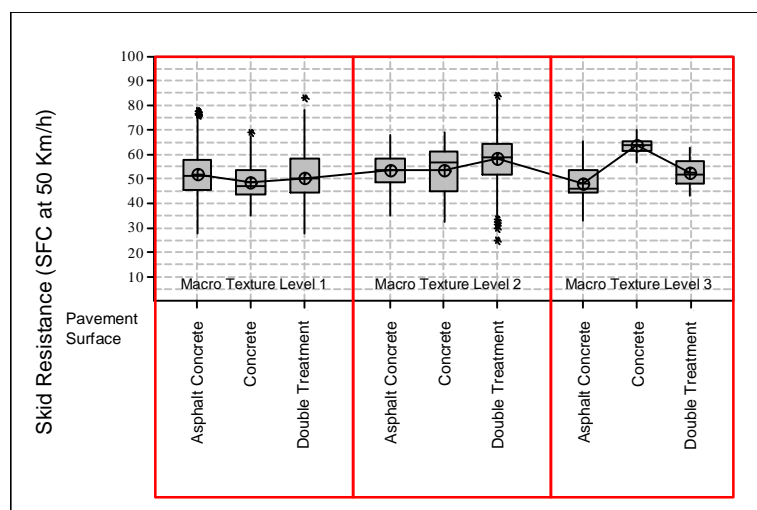
media de la macro textura, puesto que en todos los casos la variación es inferior a 0,1 mm. Por tanto, es posible afirmar que la Macro Textura no está correlacionada con el resto de variables dependientes.

Análisis de la Resistencia al Deslizamiento

El análisis exploratorio de la Resistencia al Deslizamiento consideró la totalidad de los datos medidos en terreno. La Figura 4 muestra los diagramas de caja que describen en términos generales el comportamiento de la Resistencia al Deslizamiento.

La Figura 4 muestra que la Resistencia al Deslizamiento varía entre 0,25 y 0,95. Sin embargo dichos valores corresponden a casos extremos y aislados. El valor de medio de la Resistencia al Deslizamiento considerando todas las superficies fue de 0,53 con una desviación estándar de 0,09. Se puede ver además que la Resistencia al Deslizamiento, a escala de red no depende del nivel de la Macro Textura.

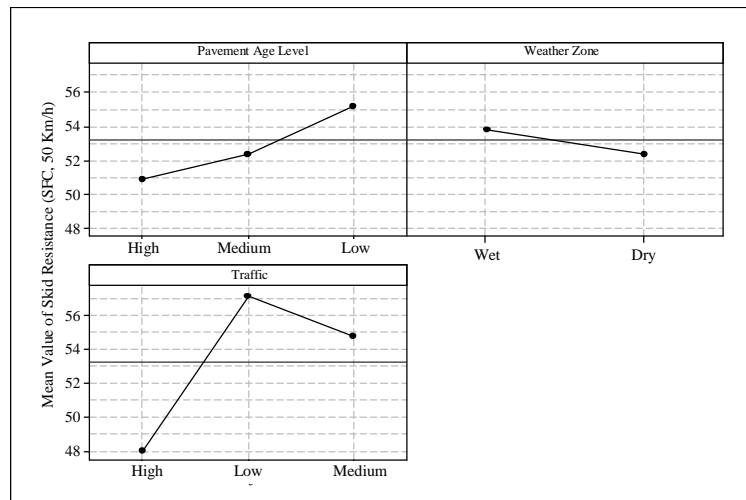
Figura 4: Diagrama de caja de la Resistencia al Deslizamiento para cada tipo de pavimento y nivel de Macro Textura.



Por su parte el análisis de efecto de factores sobre la Resistencia al deslizamiento se muestra en la Figura 5. Se puede ver que la edad del pavimento y nivel de tránsito afectan a la media de la Resistencia al Deslizamiento. El panel de la edad del pavimento muestra que en pavimentos antiguos (*age level 1* en la figura) la Resistencia al Deslizamiento es menor que en pavimentos nuevos (*age level 3* en la figura). Este resultado confirma en términos genéricos el comportamiento esperado y descrito en la literatura acerca de la variación de la

resistencia al deslizamiento en el tiempo. El panel del tráfico muestra un comportamiento similar. La resistencia al deslizamiento es menor en caminos con alto tráfico e inferior en caminos con bajo tráfico. Este resultado también es consistente con lo que presenta la literatura internacional sobre este tema.

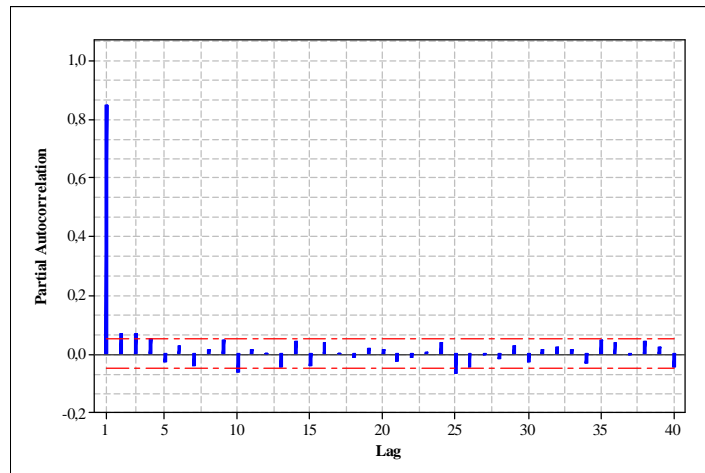
Figura 5: Resumen gráfico del análisis de factores sobre la Resistencia al Deslizamiento.



Verificación de la Hipótesis de Ergodicidad Débil

La ergodicidad es una propiedad de ciertos procesos estocásticos. Se refiere a que la media acoplada de las realizaciones del proceso es equivalente a la media temporal (Taylor and Karlin, 1998). Si se verifica, es posible extraer ventanas de datos de una realización del proceso en cualquier instante de tiempo y garantizar que esos datos son representativos del proceso estocástico. Asimismo, todas las ventanas pueden ser ensambladas para obtener una representación del proceso mediante trozos de diferentes realizaciones. Matemáticamente la hipótesis ergódica es compleja de verificar. Por tal motivo se dispone de pruebas simplificadas que permiten relajar los requisitos de ergodicidad. En este caso, se utilizó el test de ergodicidad débil, el cual permite mediante el estudio de la función de auto correlación parcial del estudio, verificar la ergodicidad en forma práctica y sencilla: si la función de auto correlación parcial tiende a cero cuando el parámetro de retardo (lag) tiende a infinito, entonces se dice que el proceso es débil – ergódico y por tanto la hipótesis se verifica. Para verificar la hipótesis, primero se construyó un modelo de media móvil de orden 1 (MA(1)) de la resistencia al deslizamiento. Sobre ese modelo se calculó posteriormente llegando a la función de auto correlación parcial que muestra la Figura 6.

Figura 6: gráfico de la función de auto correlación parcial de la resistencia al deslizamiento respecto del retardo (lag).



La figura muestra que efectivamente la función tiende a cero rápidamente desde el valor de retardo 5, por lo cual se puede afirmar que la hipótesis de ergodicidad débil es verdadera y en consecuencia, el método de muestreo es válido.

COMPORTAMIENTO TENDENCIAL Y ESTACIONAL DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

El análisis del comportamiento tendencial y estacional de la resistencia al deslizamiento se realizó mediante la modelación. Para ello primeramente se calibraron modelos independientes para ambos comportamientos y posteriormente fueron acoplados.

El Modelo Conceptual

El modelo conceptual consta de 4 módulos, que relacionan mediciones, tráfico y comportamiento de la resistencia al deslizamiento. La Figura 7 muestra las relaciones funcionales entre tales temas. A continuación se explica cada uno de ellos.

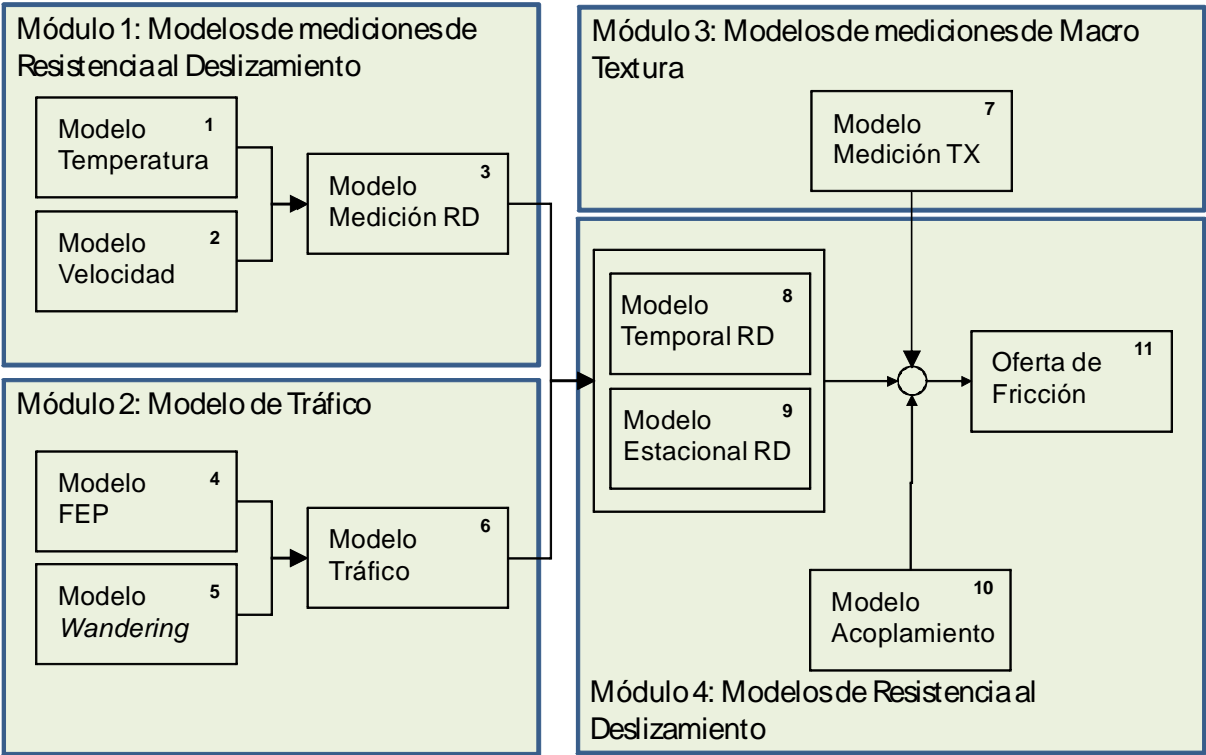
Modulo 1: Modelo de Mediciones de Resistencia al Deslizamiento. Este modelo tuvo por objetivo el obtener datos de resistencia al deslizamiento uniformizados y libre de datos anómalos. El detalle de este módulo se explica en Echaveguren et al (2009), por lo cual no se abunda en detalles en este trabajo.

Módulo 2: Modelo de tráfico. Este modelo estima el tráfico equivalente acumulado (TEA). El modelo considera por un lado el efecto de wandering (u oscilación lateral) de las corrientes vehiculares a lo largo de la huella de desplazamiento. Asimismo, estima el factor de daño por pulimento en base al modelo de equilibrio de Brush. Dicho modelo permite estimar el efecto relativo de las fuerzas de corte que inducen el pulimento de los agregados. Se calculó para 4 tipos de vehículo y se reconstruyó la historia de tráfico de todas las secciones de medición.

Módulo 3: Modelo de mediciones de Macro textura. Este modulo tuvo por finalidad el lograr mediciones de Macro Textura adecuadas para la modelación. Se desarrollo en base a lo indicado en (MOP, 2003).

Módulo 4: Modelos de resistencia al deslizamiento. Estos modelos fueron clasificados en tendenciales y estacionales. Los primeros se calibraron para una ventana de tiempo de 20 años y lo segundos utilizando un ciclo estacional completo. El resultado de este modelo es la oferta de fricción en el tiempo.

Figura 7: Modelo Conceptual para caracterizar el comportamiento en el tiempo de la resistencia al deslizamiento.



El Modelo de Tráfico

El modelo está compuesto por dos elementos uno que determina el efecto de pulimiento por daño y otro que expresa el efecto del wandering. Esto permite definir un valor de tráfico equivalente por una línea virtual de desplazamiento del neumático derecho del vehículo, como eje de modelación.

Factor de Pulimiento Equivalente

Las ecuaciones 1 y 2 muestran las expresiones de cálculo del factor de pulimiento equivalente (FPE), desarrollado por Echaveguren (2008). De acuerdo al modelo de Brush (Svendenius and Wittermark, 2003), se asume que existe adhesión y deslizamiento en el contacto entre neumático y pavimento, por lo cual el área de contacto se divide en dos porciones, una en donde existe adhesión y otra en donde existe deslizamiento puro. De este modo, la fuerza horizontal de pulimiento puede expresarse mediante la ecuación 1.

$$F_{ij,sj} = F_s + F_a = \int_{-a}^{x_{cis}} \mu q_z(x) dx + \int_{x_{cis}}^a c_p \frac{v_{sx}}{wR} (a-x) dx \quad (1)$$

F_s y F_a son las fuerzas de deslizamiento y adhesión; μ corresponde al coeficiente de fricción máxima para un porcentaje de bloqueo del 20 %; $q_z(x)$ corresponde a la presión distribuida en la impronta del neumático; C_p corresponde a la rigidez de los neumáticos para cada vehículo tipo, w corresponde a la velocidad angular del neumático, R a su radio v_{sx} a la velocidad de deslizamiento; a corresponde a, radio nominal de la impronta del neumático, x_{cis} corresponde al punto en donde se separan las fuerzas de adhesión y deslizamiento y x la variable de integración.

Si se estiman las fuerzas de corte en cada neumático, para cada tipo de vehículo respecto de un vehículo liviano, es posible encontrar el factor de pulimiento equivalente (FPE) descrito por la ecuación 2. Dicho factor asume que la fuerza de pulimiento y la dureza de los granos minerales de los agregados es suficiente para pulirlos.

$$FPE_i = 2 \sum_{j=1}^n \frac{F_{ij}}{F_{sj}} \quad (2)$$

Con las ecuaciones 1 y 2, se calculó para camiones con acoplado un valor de FEP de 16 ± 8 ; para camiones sin acoplado un valor de FEP de 10 ± 4 y para buses un valor de FEP de 7 ± 2 .

Efecto de la Oscilación Lateral

La oscilación lateral (o wandering) corresponde a la oscilación de la trayectoria del vehículo a lo largo de la trayectoria teórica seguida por el neumático derecho de un vehículo respecto de la demarcación derecha en una pista. Producto de esta oscilación no todas las pasadas ocurren por la misma huella y por lo tanto la misma superficie unitaria no se desgasta de la misma forma con cada pasada de un vehículo. Al incorporar este efecto en el cálculo del tráfico acumulado equivalente tiene la sollicitación de tráfico se atenúa y por tanto la tasa de caída teórica de resistencia al deslizamiento en el tiempo también se atenúa.

De acuerdo a estudios internacionales y en ausencia de estudios similares en Chile, se propuso considerar una distribución de probabilidades de tipo triangular, que corresponde a una simplificación de los resultados de D'apuzzo y Festa (2004), con el fin de acotar los valores extremos. Los valores utilizados fueron: Vehículos Livianos: T(0.2,0.7,1.1); Vehículos Pesados: T(0.1,0.3,0.6).

Modelo de Tráfico

Una vez traducido el tráfico a valores equivalentes, se desarrolló la ecuación de acumulación de tráfico (ecuación 3), la cual permite estimar a partir de los datos históricos una predicción de tráfico. Con los datos obtenidos, se realizó una simulación para identificar patrones de comportamiento.

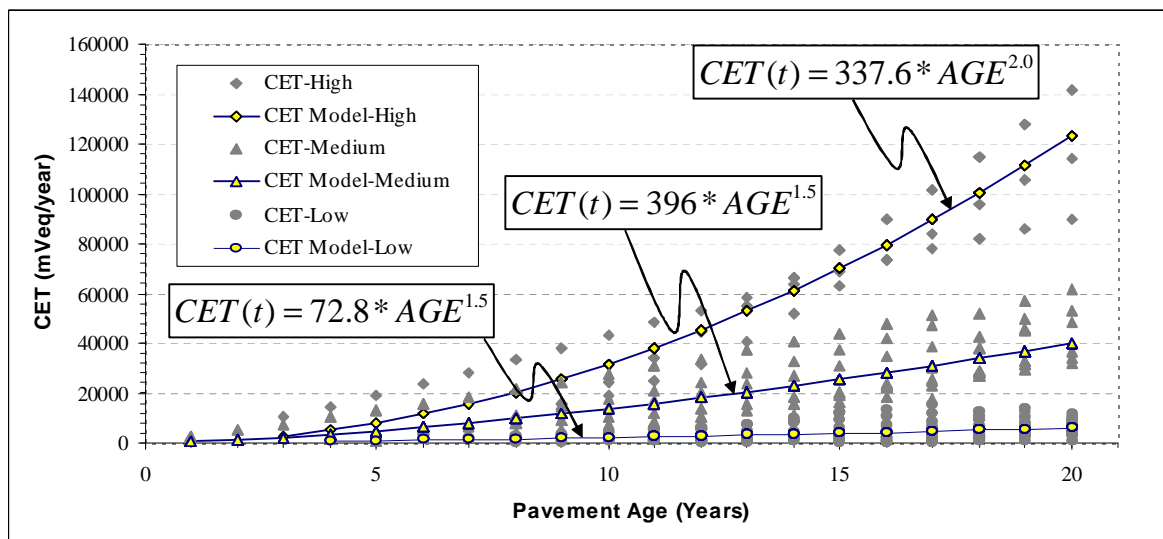
$$TE(t+1) = TE(t) + TMDA \left[P_H \left\{ P_{AH} FEP(1+I_H)^t - P_{AL}(1+I_L)^t \right\} + P_{AL}(1+I_L)^t \right] \quad (3)$$

En la ecuación 3, P_H corresponde al porcentaje de vehículos pesados; I_H es la tasa de crecimiento de vehículos pesados; I_L es la tasa de crecimiento de vehículo livianos; TMDA es el tránsito medio diario anual en la pista de modelación en el año de referencia; FEP es el factor de equivalencia por pulimiento, $TE(t)$ y $TE(t + 1)$ corresponden al tráfico equivalente acumulado en los años t y $t + 1$ respectivamente, P_{AH} es la probabilidad que los vehículos pesados se localicen en el centro de su pista; P_{AL} es la probabilidad que los vehículos pesados se localicen en el centro de su pista. Las tasas de crecimiento de vehículos pesados y livianos, y su distribución porcentual se estiman a partir de la base de datos de

tráfico. El valor de TMDA corresponde al TMDA inicial, y se obtiene a partir de la calibración de modelos de crecimiento de tránsito en cada arco.

Posteriormente, mediante análisis de conglomerados, los tráficos acumulados equivalentes se agruparon en 3 niveles: alto, medio y bajo. La Figura 8 muestra los datos de tráfico a los cuales se le superpuso modelos no lineales de predicción. Dichos modelos arrojaron coeficientes de correlación entre 0,94 y 0,99. Los modelos calibrados, son válidos para redes viales en los cuales no existe interacción de tráfico que lleve a congestión, es decir, para redes con niveles de Servicio entre A y C.

Figura 8. Modelos de tráfico acumulado equivalente estratificados por niveles de tráfico.



Modelo de Comportamiento Tendencial de la Resistencia al Deslizamiento

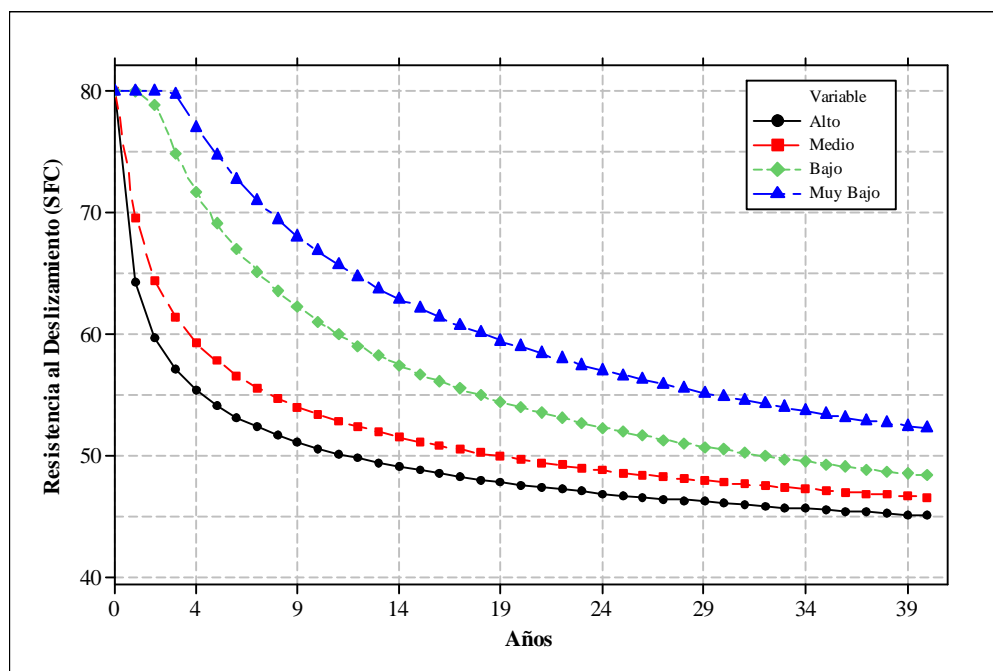
Se realizaron calibraciones preliminares para identificar las mejores formas funcionales. Finalmente se seleccionaron los modelos de Hoerl, Weibull y Potencial dado que estos presentaban una buena calibración y consistencia con el comportamiento físico del fenómeno. Finalmente se seleccionó la especificación de Weibull mediante regresión no-lineal robusta. La ecuación 4 muestra la expresión final que describe el comportamiento de la resistencia al deslizamiento en el tiempo.

$$SR = A + B e^{\frac{C}{CET(t)^D}} \quad (4)$$

El error estándar obtenido varió entre 0,01 y 0,06 y el coeficiente de correlación entre 0,60 y 0,95, dependiendo del tipo de superficie y del nivel de macro textura. El valor de CET(t) utilizado corresponde a los modelos descritos en la Figura 8. La Figura 9, muestra gráficamente las calibraciones realizadas. El análisis del modelo calibrado puede resumirse en los siguientes hechos:

- El comportamiento en el tiempo de la RD en superficies de hormigón es más estable que en superficies asfálticas, puesto la reducción de RD en los primeros 5 años no es significativa. En contraste, en superficies asfálticas esta reducción puede llegar a ser de 0,13 unidades en los primeros 5 años.
- En caminos de bajo tránsito, la tasa de caída de la RD es baja, llegando a ser de 0,01/año en los primeros 5 años. En el caso de caminos con alto tránsito, esta tasa aumenta a 0,05/año en los primeros 5 años.
- En caminos de bajo tránsito si se programan intervenciones cada 5 a 10 años, combinado con altos valores de RD en la construcción en el largo plazo el mínimo valor puede situarse hasta un 40 % por sobre un valor mínimo absoluto de RD igual a 0,35.

Figura 9: Comportamiento tendencial de la resistencia al deslizamiento en superficies asfálticas y de hormigón, para diferentes niveles de tráfico.



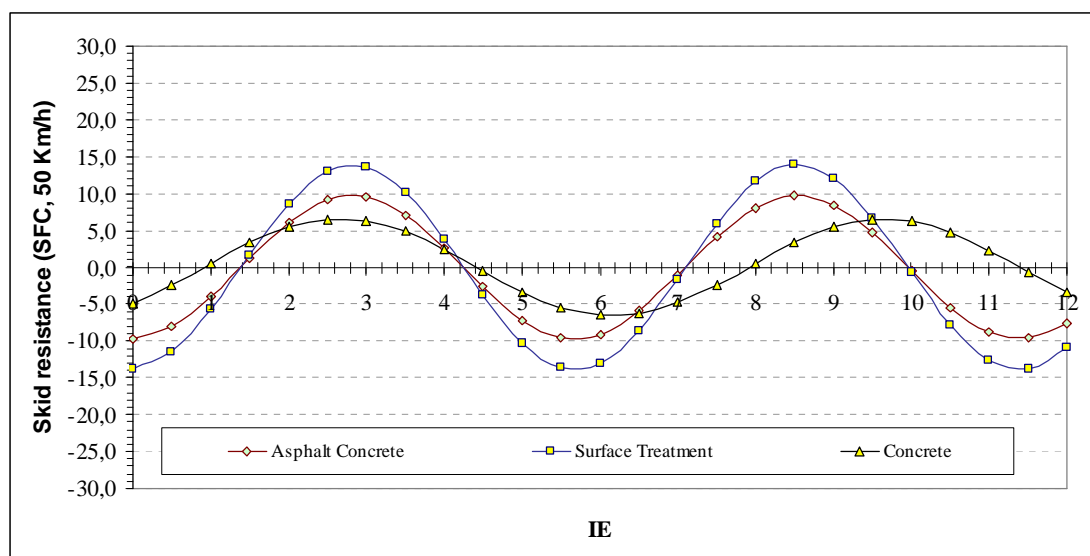
Modelo de Comportamiento Estacional de la Resistencia al Deslizamiento

Para calibrar este modelo se utilizó una especificación sinusoidal considerando como variables de calibración la amplitud, frecuencia y desfase, como lo muestra la ecuación 5. En ella SI es el índice estacional, el cual considera cada estación del año como un número entero. SRB es la resistencia al deslizamiento de referencia, o base, que habitualmente coincide con el valor de resistencia al deslizamiento de largo plazo. A0 es la amplitud de la oscilación, w es la longitud de onda, y D es el desfase respecto del punto de inicio de la onda oscilatoria.

$$SR(SI) = SRB + A0\cos(wSI + D) \quad (5)$$

El modelo fue calibrado y validado considerando tres tipos de superficie de pavimentos y dos niveles de macro textura. El error estándar obtenido por los tres modelos al aplicar regresión no-lineal robusta osciló entre 0,04 y 0,11 lo cual se considera aceptable. El menor error estándar se obtuvo en superficies de hormigón y el mayor en los tratamientos superficiales. La Figura 10 muestra gráficamente los modelos calibrados con la ecuación 4.

Figura 10: Modelos de comportamiento estacional para diferentes superficies de pavimento.



A partir de la modelación se concluyó que las superficies de hormigón exhiben un comportamiento más estable que el resto de superficies, teniendo en cuenta que la amplitud de la oscilación obtenida fue de 0,07. En las superficies asfálticas y tratamientos superficiales, la amplitud obtenida fue de 0,1 y 0,15 respectivamente.

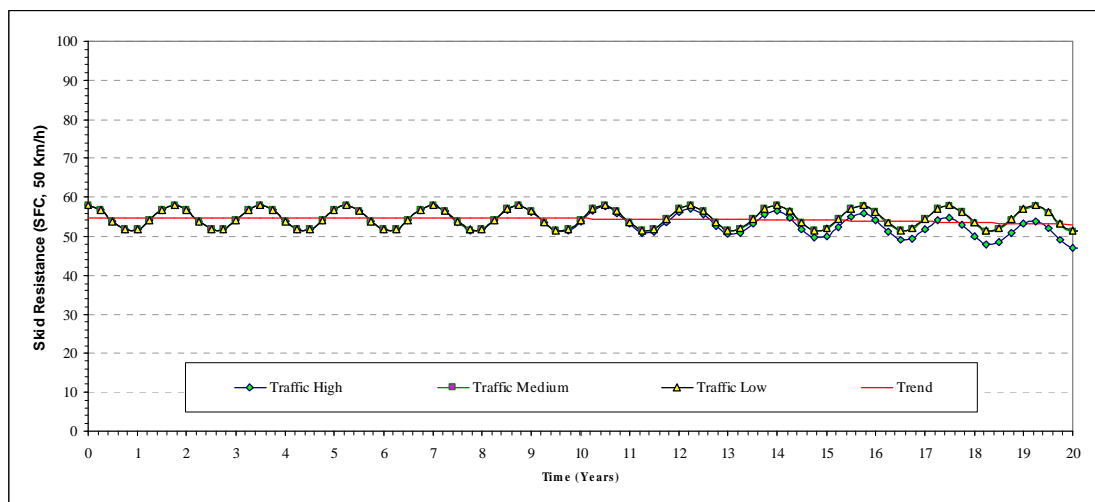
En la literatura, la mayoría de los modelos utilizan un período de de un año respecto del calendario Juliano, para describir el comportamiento estacional. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que esto no es del todo cierto, dado que el período encontrado fue alrededor de 1,1.

Modelo de Comportamiento Acoplado de la Resistencia al Deslizamiento

Los modelos de tendencia y estacionales fueron acoplados para evaluar en forma más integrada el comportamiento de la resistencia al deslizamiento. Las Figuras 11 y 12 muestran los modelos resultantes para superficies de hormigón y tratamientos superficiales para diferentes niveles de tráfico. Las superficies de concreto asfáltico representan una posición intermedia entre los modelos presentados.

A partir de la figura 11 se puede concluir que en pavimentos de hormigón la principal fuente de variación de la resistencia al deslizamiento es la oscilación estacional. De acuerdo a los resultados de las mediciones en terreno en pavimentos de hormigón entre 11 y 20 años, se determinó que el valor de largo plazo de resistencia al deslizamiento oscila entre 0,5 y 0,6. Este valor, en un sentido general, puede ser considerado como un valor de equilibrio alrededor del cual oscila la resistencia al deslizamiento con una amplitud de 0,07 unidades.

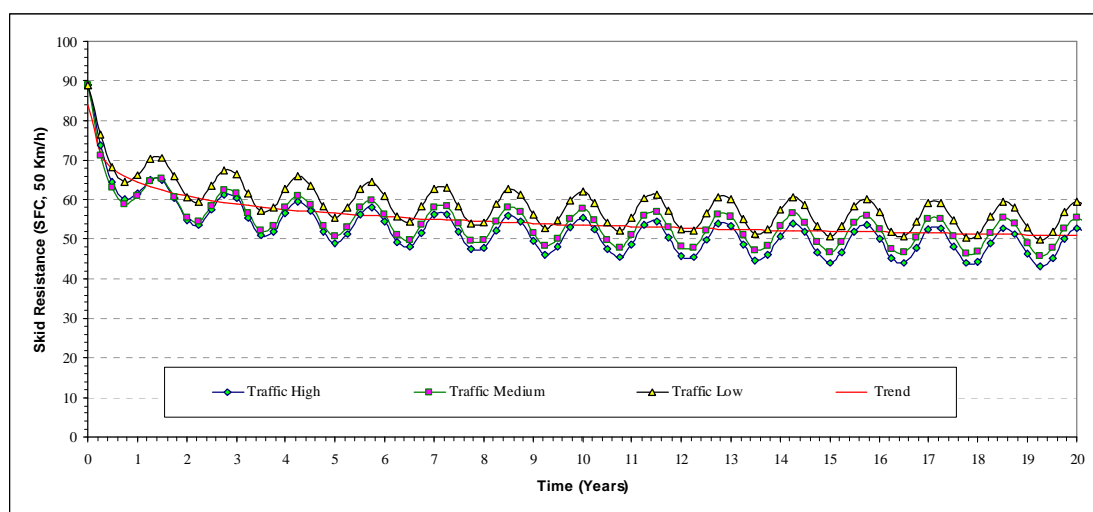
Figura 11: Modelo Integrado de Resistencia al Deslizamiento en superficies de hormigón para diferentes niveles de tráfico.



En contraste con las superficies de hormigón, se determinó que aproximadamente el 50 %

de la pérdida de resistencia al deslizamiento en superficies asfálticas es debido al efecto estacional, especialmente cuando el pavimento es puesto en servicio en invierno. En ese caso, se determinó que existe un desfase entre 3 y 9 meses antes que comience la pérdida de resistencia al deslizamiento. Esto es consistente también con el proceso de acomodación de los agregados.

Figura 12: Modelo Integrado de Resistencia al Deslizamiento en tratamientos superficiales para diferentes niveles de tráfico.



En los caminos pavimentados con bajo tránsito habitualmente se utilizan tratamientos superficiales y en casos aislados concreto asfáltico. En ambos casos, en los primeros años de puesta en servicio (o de aplicación de mantenimiento) el máximo valor observado de resistencia al deslizamiento fue de 0,9. El modelo integrado muestra que dicho valor puede caer hasta 0,4 en un lapso de 20 años.

Sin embargo, si se toma ese valor como referencia y se le acopla la oscilación estacional, dicho valor en algunas épocas del año pueda caer hasta 0,25 lo cual es un valor muy bajo en términos de seguridad vial. Los caminos con más alto tráfico generalmente se pavimentan con mezclas asfálticas densas. En ese tipo de superficies el valor máximo promedio de resistencia al deslizamiento obtenido fue de 0,72 en el primer año y el mínimo de 0,4 en 20 años.

CONCLUSIONES

La investigación descrita en este trabajo explica el primer experimento a gran escala para estudiar la resistencia al deslizamiento en la red vial de Chile. Este experimento constituyó la primera etapa en el proceso de actualización de las normativas de medición, armonización, diseño de sistemas de control de calidad y fijación de umbrales de resistencia al deslizamiento. Contribuyó de manera importante a comprender el comportamiento de la resistencia al deslizamiento como punto de partida para la actualización de la normativa.

Una actividad clave para comprender el comportamiento de la resistencia al deslizamiento es obtener datos de campo. Para ello es preciso desarrollar un plan de mediciones que asegure por un lado representatividad estadística y por otro una adecuada cobertura espacial. Para ello un aporte fundamental son las técnicas de diseño experimental en conjunto con el método de muestreo de ventanas. Esto complementado con una adecuada estandarización de los métodos de medición en campo, favorecerán el contar con datos de calidad.

No obstante, se debe tener precaución al aplicar el método de muestreo de ventanas, dado que se debe verificar el cumplimiento de la hipótesis de ergodicidad débil para poder aplicar el ensamblaje de las ventanas de medición. Esto entraña una dificultad práctica importante, dado que no se conoce a priori si esta hipótesis se cumplirá o no. Para salvar esta dificultad, es posible realizar pruebas piloto para realizar una pre-evaluación de dicha hipótesis.

La resistencia al deslizamiento posee una alta variabilidad dependiendo de las condiciones climáticas, del pavimento y del propio equipo de medición empleado. A efectos de modelación, la medición, procesamiento y análisis de datos es más riguroso que en el caso de otras variables de comportamiento del pavimentos. Por ello, se requiere contar con un riguroso sistema de control de calidad de las mediciones tanto en la toma de datos como en el procesamiento.

El tráfico equivalente acumulado es la variable que mas contribuye a la pérdida de resistencia al deslizamiento en el tiempo. Por tal razón, se elaboró un modelo de tráfico que mejoró las propuestas existentes en el estado del arte para calcular factores de pulimiento equivalente. En este caso, se utilizó el modelo de Brush, el cual permite para cualquier tipo de vehículo estimar las fuerzas de corte que intervienen en el pulimento de la micro textura.

Los modelos de comportamiento de resistencia al deslizamiento contribuyen a comprender el comportamiento de largo plazo de la resistencia al deslizamiento y contribuir así a la implementación racional de acciones de mantenimiento y supervisión.

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 empresas concesionarias del grupo CINTRA, que integraron el proyecto también en calidad de contrapartes.

REFERENCIAS

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd Edition. Academic Press.

D'apuzzo, M. y Festa, B. (2004). The Evaluation of the Evolution of Road Surface Friction: A Case Study in Naples' District. En *Actas del 3er Congreso Euroasphalt & Eurobitume Tomo I*, 1146 – 1160.

De Solminihac, H. Echaveguren, T. and Bustos, M. (2006). Análisis de modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento en pavimentos. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 21(3), 157-168.

De Solminihac, H. Echaveguren, T. Chamorro, A. Vargas, S. y Bustos, M. (2007) Procedimiento de medición y procesamiento de datos de resistencia al deslizamiento medidos con equipo SCRIM. Documento Técnico TM-014-06-2. Proyecto FONDEF D03I-1042. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Echaveguren, T de Solminihac, H Chamorro, A Vargas – Tejeda, S y Bustos, M (2009). Sistema de Medición Continua de Resistencia al Deslizamiento. Artículo enviado a XIV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 14 – 18 de Septiembre de 2009, Mar del Plata, Argentina.

Echaveguren, T. (2008) Modelación de la Resistencia al Deslizamiento en Pavimentos. Tesis Doctoral. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.

- Erdfelder, E. Faul F. and Burchner, A. (1996). GPOWER: A general power analysis program. *Behavioral Research Methods, Instruments & Computers*, 28, 1 – 11.
- Jarque, C and Bera, A (1987). A test for normality of observations and regression residuals. *International Statistic Review*, 55(2), 163 – 172.
- Lawford, S. (2005). Finite-simple quantiles of the Jarque-Bera test. *Applied Economic Letters*, 12, 351 – 354.
- MOP (2003). Seguridad Vial: Método para la determinación la textura superficial del pavimento mediante perfilometría láser. *Manual de Carreteras, Volumen 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Sección 8.602.27*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Svendenius, J. y Wittermark, B. (2003), *Review of Wheel Modeling and Friction Estimation*. ISRN LUTFD2/TFRT-77607-SE. Lund: Institute of Technology.
- Taylor, H. M. and Karlin, S (1998). *An introduction to stochastic modeling*. 3rd Edition. Academic Press. London.
- Vargas, S. de Solminihac, H. and Echaveguren, T. (2008) Proposal of a segmentation procedure for skid resistance data. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(B), 89-104.
- Videla, C De Solminihac, H Gaete, R and Bustos, M (1996). Ajuste de factores de calibración para ampliar modelos de deterioro en pavimentos asfálticos. Proyecto DGOP-190-08-03-1994. DICTUC. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.