



**UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA**

Facultad
de Ingeniería
& Ciencias





Como Casa de Estudios, esta última década hemos impulsado un fuerte proceso de internacionalización, buscando potenciar y fortalecer las redes de colaboración a través del desarrollo de nuevo conocimiento, a través de la investigación, la docencia de pregrado y postgrado y el desarrollo de programas y actividades conjuntos con prestigiosas universidades y centros de investigación en diversos países.

Esta valiosa vinculación, que es posible traducir hoy día a más de 250 convenios de cooperación internacional con 190 universidades en los cinco continentes, es posible evidenciar a través de diferentes acciones, siendo la revista de Ingeniería de Obras Civiles (RIOC), del Departamento de Ingeniería de Obras Civiles de la Facultad de Ingeniería y Ciencias, una de ellas.

Desde un punto de vista científico-tecnológico, esta publicación nos presenta diferentes trabajos de investigación y desarrollo que lideran académicos e investigadores de nuestro país y del extranjero en el área de la construcción.

Ese ha sido su sello característico desde su primer número y hoy, ya en su quinta edición, este Departamento vuelve a dar cuenta de la importancia de compartir y divulgar conocimientos en un escenario globalizado donde, como institución, estamos aunando importantes esfuerzos para contribuir en la formación de Ingenieros de clase mundial.

Teniendo presente que la Universidad de La Frontera ha definido la internacionalización como uno de sus ejes estratégicos, como Dirección de Cooperación Internacional valoramos y respaldamos las diversas acciones y estrategias que propician la institucionalización y sustentabilidad de este proceso, razón por la cual esta revista se suma como un actor relevante en este proceso.

Dra. Martha Ramírez Valdivia
Directora Cooperación Internacional
Universidad de La Frontera



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA
Departamento de
Ingeniería de Obras Civiles
Facultad de Ingeniería
& Ciencias



RIOCI es una revista de carácter científico- tecnológico que proporciona un foro nacional e internacional para la difusión de la investigación y desarrollo en todos los ámbitos relacionados con la construcción, entendiéndose áreas como materiales de construcción, ciencias de la ingeniería aplicada, arquitectura, edificación, obras civiles, gestión de proyectos, entre otras.

En un momento en que existe una gran necesidad por estar continuamente actualizados en todos los profesionales del área de la construcción para optimizar el uso de recursos, utilizar nuevas tecnologías que sean sustentables y eficientes, y a su vez, emplear nuevos métodos de construcción y materiales, RIOCI proporciona un espacio para compartir y divulgar conocimientos, de manera tal, de abrir la discusión en estas temáticas planteadas, entregando información esencial que ayudará a mejorar la eficiencia, la productividad y la competitividad en los profesionales del área de la construcción. Por lo tanto, es una lectura esencial para proporcionar a los profesionales del área, académicos y alumnos que trabajan e investigan en este campo, un material de discusión que renueve y actualice sus conocimientos.

En este contexto, RIOCI hace extensiva la invitación a todos los interesados a publicar sus artículos con la finalidad de divulgar la producción científica- tecnológica de académicos, investigadores, profesionales y estudiantes en temas relacionados con el desarrollo del área de la construcción.

Comité Editorial Asociado
Revista Ingeniería de Obras Civiles
Universidad de La Frontera



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA
Departamento de
Ingeniería de Obras Civiles
Facultad de Ingeniería
& Ciencias



Director

Gonzalo Valdez

Editora Responsable

Viviana Letelier

Editores Asociados

Daphne Bormann

Ester Tarela

Revista Ingeniería de Obras Civiles

Avda. Francisco Salazar 01145
Temuco
Región de la Araucanía
Chile

Departamento de
Ingeniería de Obras Civiles
Universidad de La Frontera

Fono:
+ 56 (45) 2325680
Fax
+56 (45) 2325688

Correo Electrónico:
rioc@ufrontera.cl

ISSN 0719- 0514

Comité Editorial

Ph.D. Tatiana Amaral

Universidade Federal de Goiás, Brasil.

Ph.D. Adriana Martínez

Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

MSc. Carlos Aguirre

Escuela de Construcción Civil, Universidad Católica de Chile,
Santiago, Chile.

Ph.D. Galo Valdebenito,

Instituto de Obras Civiles, Universidad Austral, Valdivia, Chile.

Ph.D. Gonzalo Valdés,

Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera,
Temuco, Chile.

Ph.D. Mario Salazar,

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana,
Morelia, México.

Ph.D. Oscar Link,

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción,
Concepción, Chile.

Ph.D. Oscar Reyes,

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada,
Bogotá, Colombia.

MSc. Ramón Botella,

Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Ph.D. Virginia Vásquez,

Departamento de Arquitectura, Universidad Austral, Valdivia, Chile.

Ph.D. Viviana Letelier,

Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera,
Temuco, Chile.

Ph.D. Alejandra Calabi,

Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera,
Temuco, Chile.



Sumario

- 09. Caracterización y análisis de la estadística Chilena para el diseño de pavimentos empírico-mecanicista**
Characterization and analysis of climate statistics for chilean mechanistic-empirical pavement design
Luis Osorio L., Rodrigo Delgadillo S., Carlos Whar D.
- 20. Determinación de la resistencia al corte de una arena limpia mediante ensayo de Dilatómetro Plano (DMT)**
Shear strength determination of clean sand with Flat Dilatometer Test (DMT)
Mauro Poblete, Karen Leal
- 26. Evaluación de la influencia del flujo hiporréico en el transporte de solutos mediante el uso de un modelo numérico**
Evaluating the influence of hyporheic flows on solute transport using a numerical model
Angel Monsalve
- 33. La problemática de los sistemas de suministro de agua intermitentes. Aspectos generales.**
The issues of intermittent water supply.
A general overview.
Amilkar Ernesto Ilaya-Ayza, Enrique Campbell, Rafael Pérez-García, Joaquín Izquierdo.
- 42. Matriz árido-ligante: factores implicados en la capacidad adhesiva y cohesiva del ligante asfáltico**
Aggregate – asphalt binder matrix: factors involved in the adhesive and cohesive capacities of asphalt binder.
Valdés G., Calabi A. , Sanchez E. , Miró R., Reyes O.

El equipo editorial, conformado por dos profesionales del área de la Ingeniería en Construcción y el Editor, tienen la responsabilidad de recibir los artículos y emitir un primer juicio sobre los aspectos formales, además de rechazar un artículo cuando este no cumpla con las instrucciones básicas para su publicación y esté fuera de la temática de la Revista o bien no cuente con suficiente mérito científico y académico.

El Editor enviará el artículo a un evaluador externo a la entidad o institución editora de la revista especialista en el área del tema, el cual deberá realizar su evaluación de acuerdo a una pauta previamente confeccionada. Este evaluador externo deberá rechazar, aceptar o bien aceptar con distinción un artículo. En caso de rechazo se deberá fundamentar esta situación, luego el artículo será devuelto al autor con las observaciones pertinentes.

Los evaluadores deberán verificar que se cumplan todos los aspectos formales, además de comprobar que las conclusiones estén acordes con los diseños metodológicos expuestos y los objetivos planteados. Los evaluadores conocerán la identidad de los autores, pero estos desconocerán a sus evaluadores.

De existir observaciones, sean menores o medianas, y si el artículo está aceptado, el Editor se contactará con el autor para que este realice las modificaciones indicadas en un plazo prudente, una vez realizadas estas modificaciones el artículo estará en condiciones de ser publicado.

Si el artículo no es aceptado será enviado a otro árbitro; si el rechazo es confirmado, el artículo lo será definitivamente y se comunicará al autor esta decisión y se enviarán las evaluaciones correspondientes.

Si el artículo es rechazado por un evaluador y aceptado por un segundo, se enviará el artículo a su autor con las evaluaciones correspondientes, una vez que se hayan realizado las modificaciones el Comité Editorial lo incluirá nuevamente en la lista de artículo para evaluar.



Envío de artículos

Los artículos enviados a la revista RIOCI deberán ser trabajos originales que no han sido publicados previamente ni estar presentados a otra revista. Los artículos pueden ser escritos en inglés o español y deberán ser enviados en versión electrónica en formato .doc o .docx. Los artículos deberán ser subidos a través de la página web www.rioci.cl para lo cual debe registrarse y generar un envío. El artículo será enviado a evaluadores externos especialistas en los temas específicos para su revisión. El Editor podrá solicitar revisiones y correcciones antes de tomar una decisión final de aceptación o rechazo del artículo.

Formato de los artículos

El artículo deberá cumplir el formato adjunto en la WEB, en hoja tamaño carta, dos columnas de igual ancho y espaciado de 1 cm, con un margen en el lado izquierdo y derecho de 1 cm, superior de 3 cm e inferior de 2 cm. La letra del texto debe ser Calibri 10 espaciado sencillo. Los trabajos que no cumplan con el formato indicado, serán devueltos sin ser enviados al Comité Revisor.

Primera Página

Los artículos deberán tener una página de título con el nombre completo del o de los autores, su filiación y correo y número de contacto del autor principal. El título debe estar en castellano e inglés.

Resumen, abstract y palabras claves

Se deberá indicar el resumen, este no debe exceder los 1800 caracteres (con espacios) y debe resumir los aspectos claves del artículo y una síntesis de las aplicaciones y conclusiones más importantes que el artículo entrega. El abstract debe ser una traducción correcta del resumen al inglés. Se deben incluir cuatro palabras claves tanto en español como en inglés.

Contenido del artículo

El artículo debe estar bien redactado y estructurado. La estructura del artículo debe incluir como mínimo las siguientes secciones: introducción, discusión y desarrollo, y conclusiones. La introducción debe establecer claramente el propósito del trabajo. La discusión y desarrollo deberá incluir los principales resultados y observaciones del trabajo, la metodología utilizada, etc. Las conclusiones deben ser relevantes para los lectores. El formato del contenido debe cumplir la configuración de página señalada en Formato de artículo

Referencias

Las referencias deberán reducirse a las indispensables que tengan relación directa con el trabajo enviado. En cada cita se consignarán los datos en el formato APA.

Tablas y formulas

Las tablas y fórmulas (ecuaciones) deberán ser numeradas secuencialmente en el mismo orden en que aparecen en el texto y haciendo referencia a ellas como: tabla 1, tabla 2..., fórmula 1, fórmula 2.... etc., según corresponda. Estas deben ser introducidas dentro del texto en el mismo orden en que son referenciadas. En el caso de las tablas, el título debe presentarse sobre la tabla con una fuente Calibri 8, con un espaciado anterior de 6 puntos. Interlineado sencillo. Dejar un espacio tras la tabla.

Figuras

Las figuras pueden incluir gráficos, esquemas, diagramas y fotografías. Deben numerarse en forma secuencial, en el mismo orden en que son referenciadas en el texto como: figura 1, figura 2, etc., y El título debe presentarse bajo la figura con una Fuente Calibri 8, con un espaciado anterior de 6 puntos. Interlineado sencillo. Las figuras deben ajustarse al ancho de columna. En caso necesario, es posible utilizar el ancho de impresión cambiando la sección. Dejar un espacio antes de la figura.



Caracterización y análisis de la estadística Chilena para el diseño de pavimentos empírico-mecanicista

Characterization and analysis of climate statistics for chilean mechanistic-empirical pavement design

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Luis Osorio L.¹, Rodrigo Delgadillo S.¹, Carlos Whar D.¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles
luis.osoriol@alumnos.usm.cl Tel + (56) 32-265-4380

Historial del
artículo:

Recibido
15-06-2015
Aceptado
19-11-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Simulación de
tráfico
Calibración
Incidentes
Datos de
Sistemas
Inteligentes
de Transporte

Article history:

Received
15-06-2015
Accepted
19-11-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Traffic Simulation
Calibration
Incidents
Intelligent
Transportation

Resumen

El clima es una de las variables fundamentales que incide en el desempeño de los pavimentos. Los módulos de los materiales bituminosos cambian con la temperatura, la rigidez de los materiales no ligados varía con la humedad y los gradientes térmicos afectan las condiciones de apoyo de las losas de hormigón. A pesar de lo anterior, los métodos de diseño empíricos tradicionales consideran las variables climáticas de manera muy simplista. Investigaciones en las últimas décadas han avanzado hacia un diseño empírico-mecanicista, donde los factores climáticos y las características de los materiales se incorporan con más detalle y precisión. La Guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos AASHTO 2008 (MEPDG), incorpora al clima como una de sus entradas principales, requiriendo información horaria de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, exposición solar y precipitación. En Chile se trabajó en la implementación de la MEPDG para el diseño de pavimentos rígidos a través del proyecto InnovaCorfo 11BPC-10220. Una de las tareas contempló la caracterización, validación y análisis de 17 estaciones climáticas y su relación con los deterioros. El presente trabajo resume las labores de caracterización y análisis de las variables climáticas, presenta la distribución y comparación de los factores ambientales de los climas chilenos e identifica las variables más importantes para cada deterioro en nuevos pavimentos. Los resultados indican que la exposición solar y la oscilación diaria de temperatura, son las variables climáticas más importantes para pavimentos rígidos, para pavimentos flexibles, la temperatura del aire es la variable con mayor importancia, seguida por la precipitación.

Abstract

Weather is one of the main variables influencing in pavement performance. The parameters of bituminous materials change with temperature, the strength of unbounded materials varies with humidity and the thermal gradients affect the binding conditions of concrete slabs. However, traditional empiric design methods consider these climate variables in a very simplistic way. In the last decades researchers have advanced towards a more mechanistic-empirical design, considering the weather and the properties of the materials with more detail and precision. The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide AASHTO 2008 (MEPDG), adds the weather as a main input, requiring information on temperature, relative humidity, wind velocity, solar exposure and precipitations. Chile has been lately working on the MEPDG implementation through the InnovaCorfo 11BPC-10220 project. One of the tasks of the project was the characterization, validation and analysis of 17 climate stations and its relationship with the damages. This study summarizes the development of the characterization and analysis of climate variables, presents the distribution and comparison of the Chilean environmental factors and identifies the main variables for each damage type in new pavements. Results show that solar exposition and the daily temperature variation are the most important climate variables for rigid pavements, while, for flexible pavements, the air temperature affects the most, followed by precipitations.

2. Introducción

Existe consenso en que los factores climáticos afectan el desempeño de los pavimentos, incluso la prueba que genera los modelos empíricos usados en la actualidad ("AASHO Road Test"), consideró que en algunas pistas no debían circular vehículos para observar el efecto particular del clima en el pavimento.

Los materiales y las estructuras reaccionan de diferente forma frente a distintas solicitaciones climáticas, los módulos de los materiales bituminosos cambian de forma drástica con la temperatura, así cambia también el módulo de los materiales no ligados con la humedad y aunque en pavimentos de hormigón la temperatura no afecta directamente la resistencia, los gradientes en las losas inducen esfuerzos adicionales, fallas prematuras en juntas y agrietamiento. Aunque este hecho es ampliamente aceptado, el procedimiento de diseño empírico utilizado en Chile, AASTHO 93, menciona solo 2 datos relacionados con el medio ambiente; el drenaje y la variación estacional del apoyo de la subrasante, por supuesto existe la limitación conocida de que esta ecuación empírica proviene de resultados de un solo camino y un solo tipo de subrasante (A-6).

Aunque los métodos tradicionales de diseño fueron útiles en el pasado entregando resultados satisfactorios sin una completa evaluación de los factores climáticos, la necesidad de aumentar la eficiencia y confiabilidad de los diseños y a los cambios en el volumen y tipo de circulación, hace necesaria la incorporación de otros enfoques que incluyan mayor nivel de detalle en el diseño. En las últimas décadas las investigaciones desarrolladas en ingeniería vial han avanzado hacia un diseño empírico-mecanicista, en donde los factores climáticos y las características de los materiales se incorporan con mucho más detalle, aumentando significativamente la precisión del diseño. La Guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos (GEMDP) desarrollado por AASTHO (2008), incorpora al clima como una de sus entradas principales requiriendo información horaria de: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, exposición solar y precipitación. El proyecto INNOVA 11BPC-10220 "Adaptación y aplicación de la guía de diseño empírico mecanicista de pavimentos de hormigón AASTHO 2009 GEMPD de EEUU" desarrollado por la Universidad Técnica Federico Santa María, generó en distintos años una base de datos climática con información horaria de 17 estaciones chilenas, distribuidas de norte a sur y tratando de caracterizar la mayor cantidad de climas en ciudades con densidad de caminos considerable.

3. Consideración del Clima en la GDPEM

El comportamiento de todas las capas en la estructura de pavimento es afectada por los factores climáticos [1]. Las propiedades del asfalto dependen de la temperatura, ya que, a bajas temperaturas el asfalto es duro y frágil, mientras que a altas temperaturas se vuelve blando y dúctil, a estas altas temperaturas la carpeta asfáltica es susceptible al ahuellamiento y a bajas temperaturas al agrietamiento térmico. Los pavimentos de hormigón no cambian su resistencia con la temperatura, pero los gradientes de temperatura y humedad inducen esfuerzos y deformaciones adicionales en las losas.

La fluctuación de humedad y temperatura en las capas no ligadas como base, subbase y subrasante, afectan significativamente su desempeño cuando la humedad aumenta superando el valor óptimo, el módulo disminuye y se pierde resistencia cuando la temperatura en estas capas baja los 0°C, se forman cristales de hielo que aumentan su resistencia y rigidez, pero cuando comienza el deshielo la humedad satura a estos materiales, debilitando las capas no ligadas y como consecuencia debilita la estructura completa.

Los cambios en los perfiles de temperatura y humedad en la estructura del pavimento y subrasante, durante toda la vida de diseño son considerados en la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista con el uso de una herramienta de modelamiento climático llamada "El Modelo Climático Integrado Mejorado" o EICM por sus siglas en inglés.

3.1. El Modelo Climático Integrado Mejorado

El modelo EICM es un modelo unidimensional que estima el flujo de calor y humedad en la estructura del pavimento, y con esta información simula los cambios en el comportamiento y características las capas ligadas y subrasante en relación a las condiciones climáticas durante los años de operación. El EICM es constituido por tres componentes [2]:

- El Modelo de Clima, Materiales y Estructura o (CMS model) por sus siglas en inglés, desarrollado por la Universidad de Illinois.
- El Modelo CRREL, capaz entre otras cosas de prever el levantamiento por congelamiento y asentamiento por deshielo, desarrollado por el Ejército de los Estados Unidos sección de Investigación en Regiones Frías y Laboratorio de Ingeniería.
- Modelo de Infiltración y drenaje, (ID Model), desarrollado por la Universidad de Texas A&M.

Las temperaturas en la estructura del pavimento están dominadas por las condiciones atmosféricas en la superficie de este y a pesar

de que es fácil medir la temperatura del aire, no existe una relación directa entre esta temperatura y la del pavimento, para estimar la temperatura de toda la estructura, el modelo CMS emplea un balance de energía donde se incluyen las variables climáticas y características de los materiales. Las ecuaciones utilizadas en este balance energético que determina las temperaturas y humedades en las capas ligadas y no ligadas, son invisibles al usuario y no pueden ser calibradas. En términos generales el balance energético utilizado se describe a continuación:

Dónde: $Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0$

- Q_i : Radiación de onda corta incidente.
- Q_r : Radiación de onda corta reflejada.
- Q_a : Radiación de onda larga entrante.
- Q_e : Radiación de onda larga emitida.
- Q_c : Transferencia de calor por convección.
- Q_h : Efectos de transpiración, condensación, evaporación y sublimación.
- Q_g : Energía absorbida por el suelo.

Las variables de la ecuación anterior se ilustran en la siguiente figura:

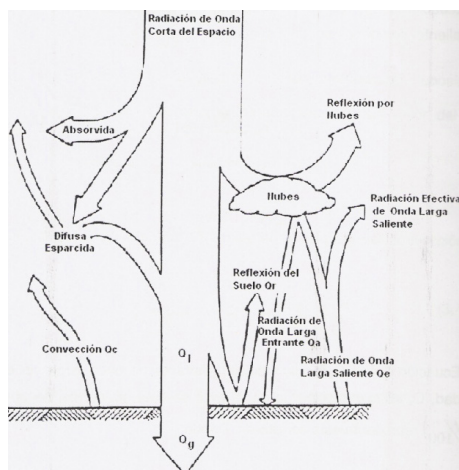


Figura 1: Diagrama del balance de energía considerado por EICM. [2].

Para llevar a cabo el análisis climático requerido para el cálculo del daño y deterioros, la Guía de Diseño requiere de la información de cinco variables relacionadas con el clima con mediciones que deben ser realizadas cada hora para todo el periodo de análisis del proyecto. Las variables consideradas son las siguientes:

- Temperatura del aire. (horaria)
- Precipitación. (diaria)
- Velocidad del viento. (horaria)
- Porcentaje de exposición al sol. (horaria)
- Humedad relativa del aire. (horaria)

La temperatura del aire es requerida en la ecuación del balance de calor que utiliza el EICM, se utiliza en los cálculos de radiación de onda larga emitida por el aire y para el cálculo de transferencia de calor por convección entre la superficie del pavimento y el aire. Adicionalmente a los cálculos de balance y transferencia de calor, la estadística de temperatura es usada para definir los periodos de congelamiento-deshielo dentro del periodo de análisis y determinar el número de ciclos de hielo-deshielo. Los flujos de calor que resultan de la precipitación e infiltración en la estructura de pavimento no son considerados en el balance de energía del EICM, el rol de la precipitación en estas circunstancias no es del todo claro y los métodos para incorporarla en estos balances energéticos no han sido considerados, sin embargo la precipitación es necesaria para calcular la infiltración en la rehabilitación de pavimentos y en el proceso de envejecimiento. La velocidad del viento es requerida en el cálculo del coeficiente de convección entre el aire y la superficie de pavimento. La cantidad (porcentaje) de exposición al sol es utilizada directamente en el balance de energía en el pavimento y corrige la cantidad de radiación que efectivamente alcanza la superficie del pavimento. La radiación incidente solo depende de la información de latitud que es ingresada por el usuario en cada diseño. En el periodo de curado, la humedad relativa del aire tiene un gran impacto en las retracciones superficiales por secado que sufren las losas de hormigón (simple y reforzado) y tiene especial importancia en el espaciamiento inicial de grietas en pavimentos de hormigón reforzados, sin embargo la guía de diseño solo utiliza esta información para cuantificar los cambios de humedad mensual en pavimentos rígidos mediante la incorporación de un gradiente de temperatura equivalente.

4. Base de Datos Climática Desarrollada

El territorio continental de Chile tiene una forma particular, de norte a sur tiene 4.270 km de largo con un ancho promedio de 177 km de este a oeste, es por ello que posee grandes contrastes climáticos, en el norte del país y hasta los 29° de latitud se encuentran climas desérticos, en el sector del centro predominan los climas templados hasta los 38° de latitud Sur, finalmente en el sector austral se cuenta con la presencia de climas lluviosos y fríos[3]. Dentro del proyecto se plantea generar una base de datos climáticos inicial[4] que caracterice algunos de los climas predominantes a lo largo de nuestro país, la selección de las estaciones se realizó considerando dos criterios, en primer lugar se procuró caracterizar la mayor cantidad de climas posibles donde la densidad de caminos sea relevante, en segundo lugar, la elección debió considerar la restricción de la información realmente disponible y qué tan completa se encuentra, de acuerdo a esto, se seleccionaron las siguientes 17 estaciones climáticas que componen la base de datos final del proyecto.

Ciudad	Estación	Lat. Sur Decimal	Long. Oeste Decimal	Elevación
Arica	Chacalluta	18.3514	70.336	63
Calama	El Loa	22.4953	69.9044	2293
Antofagasta	Cerro Moreno	23.4503	70.4411	113
Caldera	D. de Atacama	27.2636	70.7742	204
La Serena	La Florida	19.9172	71.2003	142
Valparaíso	UTFSM	33.0830	71.3500	350
Santiago	Pudahuel	33.5419	70.7944	480
Curicó	General Freire	34.9664	71.2167	225
Chillan	B. O'Higgins	36.5872	72.0400	151
Concepción	Carriel Sur	36.7792	73.0622	12
Los Ángeles	María Dolores	37.4028	72.4225	120
Temuco	Maquehue	38.7700	72.6369	92
Valdivia	Pichoy	39.6511	73.0817	18
Osorno	Cañal Bajo	40.6050	73.0608	61
Puerto Montt	El Tepual	41.4350	73.0975	85
Coyhaique	Teniente Vidal	45.5939	72.1086	310
Punta Arenas	Carlos Ibáñez	53.0050	70.8439	39

Tabla 1: Estaciones climáticas consideradas en el estudio.

La distribución de temperaturas anuales para los climas seleccionados es diversa, en el caso de los climas costeros se observa una clara tendencia según la latitud de la estación, disminuyendo la temperatura media anual hacia el sur, en el caso de los climas continentales, la distribución anual de temperaturas medias no resulta tan clara y las curvas de temperatura media mensual se acoplan en varias ciudades de la zona central, aunque igualmente las temperaturas medias anuales disminuyen con el aumento de la latitud.

4.1. Caracterización del Clima Chileno

Con el fin de caracterizar el clima disponible en la base de datos actual y aunque el programa solo necesita los datos horarios de 5 variables climáticas, existen otros parámetros íntimamente relacionados con el clima que necesitan ser analizados, en este estudio se consideró además de las variables ya mencionadas, la diferencia de temperatura diaria, el índice de congelamiento, los ciclos de hielo/deshielo y los días húmedos¹, estos parámetros son calculados automáticamente por el programa DARWin-ME v1.1 (2009) cuando se carga un nuevo clima al diseño de prueba, la humedad relativa del aire, resulta la variable menos significativa en pavimentos rígidos y su participación es nula en pavimentos flexibles, lo que se ha informado en publicaciones recientes [5], por lo que la variable humedad se omite en el análisis. Las medias anuales de las variables en estudio se resumen en la tabla 2 y 3.

Ciudad	Temp. Med [C°]	Precip [mm].	Días Húmedos [n°]	Índice de Cong. [C- Días]
Arica	18.9	18.6 [*]	6.8	0
Calama	13.5	17.3 [**]	6.6	176.7
Antofagasta	16.6	20.2 [***]	8.3	0
Caldera	14.7	15	7.7	0
La Serena	13.8	77.6	14.1	0
Valparaíso	15.8	291.1	34	0
Santiago	14.6	298.8	37.9	22.2
Curicó	13.9	591.5	47.6	27.6
Chillan	13.2	923.8	76.3	25.6
Concepción	12.6	1127.1	62.2	1.4
Los Ángeles	13.2	934.1	81.3	57.6
Temuco	11.3	1218.9	152.4	44
Valdivia	11.4	1803.4	162.8	37.3
Osorno	10.8	1220.5	159.5	61.2
Puerto Montt	10.2	1625.3	215.5	37.7
Coyhaique	8.4	1026.4	161.4	207
Punta Arenas	6.5	360.2	127.6	146.2

Tabla 2: Resumen de Variables Climáticas (1).

[*]La precipitación media anual real para Arica, corresponde a 0.47 [mm], la cual fue modificada para asegurar la estabilidad del software.

[**]La precipitación media anual para real Calama, corresponde a 2.9 [mm], la cual fue modificada para asegurar la estabilidad del software.

[***] La precipitación media anual para real Antofagasta, corresponde a 2.12 [mm], la cual fue modificada para asegurar la estabilidad del software.

Ciudad	Nº Ciclos de Hielo Deshielo	Velocidad del Viento [km/h]	Exposición al Sol [%]	Delta T° [C°]	Latitud Sur [decimal]
Arica	0	10.3	58	4.16	18.35
Calama	78.7	26.8	85.9	20.78	22.5
Antofagasta	0	12.9	36.9	4.97	23.45
Caldera	0	12.8	48.7	8.46	27.26
La Serena	0	9.3	52.8	6.69	29.92
Valparaíso	0	7.7	58.8	8.48	33.08
Santiago	14.2	8.7	59.7	14.12	33.54
Curicó	18.6	10.2	50	13.59	34.97
Chillan	15.9	9.5	55.5	13.29	36.59
Concepción	1.1	12.8	58.1	9.16	36.78
Los Ángeles	24.8	13.4	51.9	13.44	37.4
Temuco	24	7.8	42.9	11.66	38.77
Valdivia	24.5	9.5	35	11.22	39.65
Osorno	30.4	9.7	30.7	11.35	40.61
Puerto Montt	33.6	10.5	32.7	8.55	41.44
Coyhaique	56.7	9.4	33	9.48	45.59
Punta Arenas	50.3	23.1	35.1	6.54	53.01

Tabla 3: Resumen de variables climáticas (2).

¹ Días húmedos, días en la que precipitación diaria supera los 0.1 [pulg] o 2.54 [mm].



Para cuantificar la dispersión de las variables climáticas se grafica la media de estas variables (más/menos) la desviación estándar que se obtiene del grupo de datos, se presentan en la misma grafica todos los climas a fin de facilitar la comparación, en forma adicional se fabrican histogramas normalizados de frecuencia, para las 5 variables en estudio, más la oscilación térmica diaria, el detalle de estos histogramas se presentan en el Anexo N°1.

Grafico 1: Temperatura media anual, según estación climática.

Grafico 2: Humedad relativa del aire, según estación climática.

Grafico 3: Velocidad media del viento, según estación.

Grafico 4: Exposición al sol, media anual, según estación.

Grafico 5: Precipitación media anual, según estación.

5. Análisis de la Influencia Climática en el Diseño de Pavimentos

la información que es procesada para considerar los factores medioambientales en la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista proviene de datos ingresados directamente por el usuario, desde las características de los materiales (absorción de onda corta, conductividad térmica), hasta la información climática a utilizar (estación según latitud y longitud). En el caso estadounidense, la calidad de la información climática ingresada es a veces de mala calidad, y en estaciones que se encuentran cerca geográficamente, la Guía predice deterioros completamente distintos, lo que no es realista [6], se ha recomendado incluso que esas estaciones con información incompleta o de mala calidad sean eliminadas de la base de datos [7]. Paralelamente al estudio de la calidad de la información se han realizado estudios de la influencia de cada una de las variables climáticas en la predicción de desempeño en pavimentos flexibles, resultando ser la temperatura la variable más importante para los deterioros en pavimentos flexibles [8] y se ha demostrado que un cambio en la estadística de cada variable climática se ve reflejado en los deterioros pronosticados [9]. Es por ello que se requiere un análisis de la estadística disponible para el caso chileno a fin de conocer que variables tienen mayor incidencia en los deterioros pronosticados.

La siguiente sección busca identificar las variables climáticas claves para cada deterioro considerado en el diseño de pavimentos nuevos, rígidos y flexibles, para una estructura tipo y cuantificar el aporte de las variables que resulten significativas para cada deterioro.

Cuatro estructuras de pavimento son utilizadas en el análisis, dos de asfalto y dos de hormigón, con las siguientes características:

Estructura débil de asfalto: 5 cm de carpeta asfáltica de rodadura, 8 cm de carpeta intermedia, 15 cm de base granular (CBR 80) y 15

cm de subbase granular (CBR 40).

Estructura fuerte de asfalto: 5 cm de carpeta asfáltica de rodadura, 12 cm de carpeta intermedia, 15 cm de base granular (CBR 80) y 15 cm de subbase granular (CBR 40).

Estructura débil de hormigón: Losa de 18 cm sobre subbase granular (CBR 50) de 15 cm.

Estructura fuerte de hormigón: Losa de 23 cm sobre subbase granular (CBR 50) de 15 cm.

El espectro de carga considerado en todas las corridas es el que se obtiene de Curacaví y fue revisado en trabajos anteriores [10]. Se utiliza un tráfico inicial tal que, pasado 20 años de vida útil el volumen de tráfico sea igual a 10 y 40 mill de EE, para la estructura débil y fuerte respectivamente. El suelo utilizado en todos los casos corresponde a uno con clasificación AASHTO A-6 con CBR 10%, se considera una mezcla densa de asfalto con betún PG 64-22 para la capa de rodadura e intermedia. En el pavimento rígido, el módulo de ruptura a los 28 días es de 4.7 Mpa y el largo de losa es de 3.5 mts, se utilizan valores por defecto para el resto de los valores de entrada.

Los deterioros pronosticados por la Guía de Diseño de presentan en la tabla 4 y 5, estos deterioros serán las variables dependientes para los dos análisis siguientes, en el primer análisis se identificarán las variables que presentan mayor correlación de Pearson con los deterioros, estas variables serán en el segundo análisis candidatas a un modelo de regresión lineal para cada deterioro y para cada nivel de tráfico. Las correlaciones se calculan con el programa de análisis estadístico, IBM SPSS Statistics 19.0 (2010). Y se resumen en la tabla 6.

Estación Climática	Estructura	Pavimento Rígido		
		Agriet. [%]	Escal. [mm]	IRI [m/km]
Arica	10 Mill EE	31.11	7.15	5.47
	40 Mill EE	0.07	9.54	6.08
Calama	10 Mill EE	87.63	10.81	7.81
	40 Mill EE	0.48	13.8	7.94
Antofagasta	10 Mill EE	11.14	6.37	4.88
	40 Mill EE	0.01	7.83	5.35
Caldera	10 Mill EE	28.21	6.42	5.12
	40 Mill EE	0.03	6.69	4.98
La Serena	10 Mill EE	14.85	6.1	4.81
	40 Mill EE	0.01	6.23	4.67
Valparaíso	10 Mill EE	60.02	7.97	6.19
	40 Mill EE	0.25	8.78	5.76
Santiago	10 Mill EE	61.8	7.07	5.83
	40 Mill EE	0.17	6.13	4.63
Curicó	10 Mill EE	48.86	6.78	5.55
	40 Mill EE	0.02	5.81	4.5
Chillan	10 Mill EE	53.85	6.92	5.67
	40 Mill EE	0.16	5.73	4.46
Concepción	10 Mill EE	28.69	6.67	5.23
	40 Mill EE	0.03	6.36	4.72
Los Ángeles	10 Mill EE	36.91	7.03	5.5
	40 Mill EE	0.08	5.48	4.36
Temuco	10 Mill EE	33.05	6.87	5.38
	40 Mill EE	0.07	6.24	4.68
Valdivia	10 Mill EE	33.23	7.05	5.46
	40 Mill EE	0.08	5.23	4.25
Osorno	10 Mill EE	8.05	6.88	5.07
	40 Mill EE	0.01	5.07	4.18
Puerto Montt	10 Mill EE	4.95	5.88	4.6
	40 Mill EE	0.01	4.24	3.83
Coyhaique	10 Mill EE	15.38	6.37	4.96
	40 Mill EE	0.02	4.58	3.99
Punta Arenas	10 Mill EE	0.11	6.23	4.7
	40 Mill EE	0	4.6	3.99

Tabla 4: Deterioros pronosticados según estación climática, pavimento rígido.

Estación Climática	Estructura	Pavimento Flexible.				
		Def. AC [mm]	Def. Total [mm]	Agriet. Long. [m/km]	Agriet. [%]	IRI [m/k m]
Arica	10 Mill EE	11.59	20.31	234.85	22.8	2.93
	40 Mill EE	21.46	30.58	346.59	31.5	3.24
Calama	10 Mill EE	7.99	16.48	185.04	19.8	2.89
	40 Mill EE	15.33	24.13	225.38	26.7	3.13
Antofagasta	10 Mill EE	8.05	16.52	200.76	20.6	2.82
	40 Mill EE	14.98	23.81	231.06	28	3.05
Caldera	10 Mill EE	7.47	15.81	176.7	19.2	2.78
	40 Mill EE	13.98	22.66	193.18	26	2.99
La Serena	10 Mill EE	6.74	15.41	164.77	20	2.82
	40 Mill EE	12.63	21.56	160.98	27.1	3.02
Valparaíso	10 Mill EE	10.8	20.56	280.3	26.9	3.05
	40 Mill EE	19.89	19.97	335.23	35.8	3.34
Santiago	10 Mill EE	11.19	20.9	240.53	25.3	3.08
	40 Mill EE	20.71	30.76	310.61	33.9	3.38
Curicó	10 Mill EE	10.27	20.46	308.71	28.4	3.14
	40 Mill EE	18.92	29.46	342.8	36.6	3.41
Chillan	10 Mill EE	10.32	20.85	393.94	31.9	3.19
	40 Mill EE	19.04	19.95	435.61	39.9	3.47
Concepción	10 Mill EE	6.52	16.75	361.74	31.3	3.04
	40 Mill EE	12.14	22.64	268.94	37.7	3.22
Los Ángeles	10 Mill EE	8.71	19.04	350.38	30.4	3.15
	40 Mill EE	16.01	26.67	344.7	38	3.39
Temuco	10 Mill EE	7.24	17.03	244.32	25.9	3.04
	40 Mill EE	13.16	23.74	212.12	33.6	3.26
Valdivia	10 Mill EE	7.42	17.97	452.65	34.2	3.17
	40 Mill EE	13.69	24.51	395.83	40.3	3.37
Osorno	10 Mill EE	5.54	15.68	331.44	29.9	3.08
	40 Mill EE	10.33	20.74	214.02	36	3.24
Puerto Montt	10 Mill EE	4.71	14.77	312.5	29.4	3.04
	40 Mill EE	8.81	19.1	165.72	34.7	3.18
Coyhaique	10 Mill EE	5.32	15.47	299.24	29.5	3.09
	40 Mill EE	9.89	20.25	167.99	34.1	3.23
Punta Arenas	10 Mill EE	2.24	11.15	75.57	18.6	2.85
	40 Mill EE	4.24	13.21	10.06	21.2	2.91

Tabla 5: Deterioros pronosticados según estación climática, pavimento flexible.

	Trafico	Deterioro	Temp. Media [°C]	Exposición al Sol [%]	Vel. del Viento [km/h]	Delta T° [°C]	Latitud Sur [decimal]	Precip. [mm]	Días Húmedos [Días]	Índice de Congelamiento [°C-Días]	Ciclos de Hielo Deshielo [n°]
Hormigón	10 Mill EE	Agrietamiento [%]	0.428	0.847	0.166	0.738	-0.434	-0.268	-0.479	0.025	0.133
		Escalonamiento [mm]	0.245	0.774	0.533	0.697	-0.424	-0.278	-0.355	0.344	0.464
		IRI [mts/km]	0.321	0.839	0.418	0.752	-0.442	-0.286	-0.417	0.244	0.365
	40 Mill EE	Agrietamiento [%]	0.259	0.808	0.434	0.689	-0.388	-0.29	-0.361	0.272	0.392
		Escalonamiento [mm]	0.574	0.804	0.476	0.314	-0.762	-0.599	-0.658	0.076	0.136
		IRI [mts/km]	0.571	0.804	0.482	0.317	-0.763	-0.605	-0.66	0.081	0.139
Asfalto	10 Mill EE	Deformación AC [mm]	0.834	0.566	-0.366	0.207	-0.65	-0.342	-0.605	-0.495	-0.467
		Deformación Total [mm]	0.679	0.448	-0.486	0.281	-0.441	-0.077	-0.387	-0.465	-0.421
		Agriet. Long. [mts/km]	-0.02	-0.151	-0.504	0.258	0.186	0.754	0.401	-0.195	-0.109
		Agriet	-0.218	-0.263	-0.512	0.235	0.411	0.84	0.561	-0.081	-0.018
		Fatiga [%]	-0.193	-0.12	-0.454	0.423	0.411	0.708	0.482	0.022	0.098
		IRI	-0.193	-0.12	-0.454	0.423	0.411	0.708	0.482	0.022	0.098
	40 Mill EE	Deformación AC [mm]	0.841	0.586	-0.344	0.218	-0.668	-0.359	-0.621	-0.485	-0.454
		Deformación Total [mm]	0.674	0.395	-0.27	0.247	-0.6	-0.191	-0.438	-0.355	-0.299
		Agriet. Long. [mts/km]	0.566	0.333	-0.436	0.298	-0.357	0.16	-0.234	-0.45	-0.372
		Agriet	0.054	-0.085	-0.611	0.273	0.176	0.691	0.347	-0.262	-0.185
		Fatiga [%]	0.054	-0.085	-0.611	0.273	0.176	0.691	0.347	-0.262	-0.185
		IRI	0.192	0.151	-0.514	0.45	0.05	0.438	0.143	-0.188	-0.104

Negrita + cursiva, la correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral). Cursiva, la correlación es significante al nivel 0.05 (bilateral).

La segunda parte del análisis se concentra en identificar que variables relacionadas con el clima, son significativas para los deterioros considerados en la Guía de Diseño, para ello se propone la creación de modelos de regresión multivariable utilizando el método de pasos sucesivos o “Stepwise”, en donde los deterioros serán la variable dependiente y cada una de las variables relacionadas con el clima se considera independiente, esta última consideración no es completamente cierta pues existen variables climáticas relacionadas entre sí, en estos casos es necesario identificar estas variables y utilizar (cuando sea posible) variables sin correlaciones fuertes entre ellas en un mismo modelo. Las variables que el algoritmo de regresión selecciona como significativas se resumen en la tabla 7, adicionalmente la última columna informa el coeficiente de determinación R2 corregido, como indicador de la variabilidad de la aproximación.

Finalmente se cuantifica el aporte de cada variable al modelo, con ello se es capaz de ordenar las variables y es posible identificar, que variable es la más importante en cada modelo. Los modelos, y el aporte de cada variable se calculan utilizando el programa IBM SPSS Statistics 19.0 (2010).

Modelos Pavimento Rígido		Variable 1	Variable 2	Variable 3	R ²
10 Mil I EE	Agrietamiento [%]	Exp al Sol	Delta °T	V. del Viento	0.85 8
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	Ciclos de H/Dh	T° Media	0.80 6
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	Delta °T	-	0.81 6
40 Mil I EE	Agrietamiento [%]*	Exp al Sol	Ciclos de H/Dh	-	0.75
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	Latitud	Ciclos de H/Dh	0.84 2
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	Latitud	Ciclos de H/Dh	0.84 6
Modelos Pavimento Flexible		Variable 1	Variable 2	Variable 3	R ²
10 Mil I EE	Ahuellamiento AC [mm]**	T°Med.	Delta °T	V. del Viento	0.84 7
	Ahuellamiento Total [mm]**	T°Med.	Delta °T	V. del Viento	0.76 7
	Agriet. Long. [mts/km]***	Precipitación	T° Media	-	0.77 9
	Agriet. Fatiga [%]***	Precipitación	T° Media	-	0.77
	IRI [mts/km]	T°Med.	-	-	0.46 8
40 Mil I EE	Ahuellamiento AC [mm]**	T°Med.	Delta °T	V. del Viento	0.84 9
	Ahuellamiento Total [mm]	T°Med.	-	-	0.41 8
	Agriet. Long. [mts/km]	T°Med.	Precipitación	Delta °T	0.69 9
	Agriet. Fatiga [%]	Precipitación	T° Media	-	0.72 6
	IRI [mts/km]	V. del Viento	Delta °T	-	0.63 6

Tabla 6: Variables significativas, en el modelo de regresión lineal multivariable seleccionado

[*] El agrietamiento calculado para 40 mill. de EE, es muy bajo (todos menores a 0.5%), el modelo no resulta confiable.

[**] El modelo con mayor R², considera la variable Latitud, la cual es eliminada del modelo por tener una alta correlación (0.910) con la variable Temperatura Media, que es la de mayor aporte del modelo.

[***] El modelo con mayor R², considera la variable días húmedos, la cual es eliminada por tener una alta correlación (0.873) con la variable Precipitación que es la de mayor aporte del modelo.

Para cuantificar el aporte de cada variable al modelo considerado se utiliza la correlación semi-parcial. La correlación semi-parcial se refiere a la correlación entre una variable dependiente (Y) y un conjunto de variables explicativas (xi), el cuadrado de la correlación semi-parcial de cada variable en el modelo es la proporción de la variabilidad de Y, debida exclusivamente al aporte de la variable en análisis, estos resultados se muestran en la tabla 8.

Modelos Pavimento Rígido		Variable	% Aporte	Variable	% Aporte
10 Mill EE	Agrietamiento [%]	Exp al Sol	33.41%	Delta °T	14.14%
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	12.67%	Ciclos de H/Dh	20.79%
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	27.35%	Delta °T	13.54%
40 Mill EE	Agrietamiento [%]*	Exp al Sol	62.73%	Ciclos de H/Dh	12.82%
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	7.56%	Latitud	21.34%
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	7.40%	Latitud	21.72%
Modelos Pavimento Flexible		Variable	% Aporte	Variable	% Aporte
10 Mill EE	Ahuellamiento AC [mm]	T°Med.	61.94%	Delta °T	14.36%
	Ahuellamiento Total [mm]	T°Med.	64.00%	Delta °T	14.75%
	Agriet. Long. [mts/km]	Precipitación	80.64%	T° Media	23.81%
	Piel de cocodrilo [%]	Precipitación	75.17%	T° Media	9.42%
	IRI [mts/km]	T°Med.	50.13%	-	-
40 Mill EE	Ahuellamiento AC [mm]	T°Med.	64.00%	Delta °T	14.75%
	Ahuellamiento Total [mm]	T°Med.	45.43%	-	-
	Agriet. Long. [mts/km]	T°Med.	65.29%	Precipitación	29.92%
	Piel de cocodrilo [%]	Precipitación	76.04%	T° Media	28.62%
	IRI [mts/km]	V. del Viento	47.89%	Delta °T	41.73%

Tabla 7: Aporte de cada variable significativa al modelo lineal generado.

6. Conclusiones

El presente estudio, donde se analizan las características del clima chileno y su relación con el diseño de pavimentos Empírico-Mecanicista, es posible concluir:

El clima nacional presenta una variabilidad que resulta sorprendente en relación al área continental que se abarca en el estudio, la base de datos actual caracteriza gran parte de ellos y se considera adecuada para la implementación de la Guía de Diseño en el territorio nacional.

La imposibilidad de calibrar los modelos climáticos de la Guía de Diseño, exige que la información climática que se ingresa al programa sea de la mejor calidad, la exactitud, cantidad de datos faltantes y extensión de la base de datos resulta clave en los deterioros pronosticados, bases de datos con mediciones horarias, sin datos faltantes y de larga extensión generaran deterioros más realistas y con menos incertidumbre, por el contrario, bases de da-

tos incompletas y de corta duración generaran deterioros acordes al clima, pero con incertidumbre sobre si la ventana de tiempo utilizada caracteriza de buena forma o no al clima en cuestión.

El clima es un factor fundamental entre los parámetros de entrada para el diseño de pavimentos nuevos, se observa que los deterioros pronosticados al cambiar solo esta variable resultan muy diferentes, en pavimentos rígidos se observan para la misma estructura y tráfico, agrietamientos que van desde 87 % (Calama) hasta 0.11 % (Punta Arenas), el escalonamiento en las losas de hormigón varía de 13.8 mm (Calama) a 4.2 mm (Puerto Montt), en pavimentos flexibles, para un tráfico de 40 mill. de EE existen deformaciones permanentes en la carpeta de rodadura, entre 21.46 mm (Arica) y 4,24 mm (Punta Arenas), el agrietamiento por Fatiga presenta variaciones entre un 40.3% (Valdivia) y 21.2 % (Punta Arenas), lo que confirma la gran influencia e importancia de los efectos climáticos en la Guía de Diseño.

El comportamiento de las variables climáticas es fundamental en la predicción de los deterioros y si bien las medias anuales nos sirven para caracterizar inicialmente los climas, la forma de la distribución en los histogramas ayuda a identificar fenómenos que tienen directa implicancia en los deterioros, (máximos dobles y/o características de distribución: curtosis y asimetría). Los climas donde los histogramas de temperatura tienden a acoplarse (Curicó y Chillan; Valdivia y Temuco) presentan agrietamientos y escalonamientos similares en pavimentos rígidos y ahuellamientos casi idénticos en pavimentos flexibles, lo que comprueba la dependencia del deterioro con la temperatura. El agrietamiento transversal en las losas de hormigón está directamente relacionado con la diferencia de temperatura diaria, los valores máximos de agrietamiento 87.63 % y 61.80 % coinciden con los climas que presentan frecuentemente diferencias entre la temperatura máxima y mínima del día por sobre los 18 C°.

La exposición al sol, es la variable más importante, en el diseño de pavimentos rígidos, seguido de la oscilación térmica diaria, la cantidad de radiación incidente definida por la latitud de la estación climática y corregida por la nubosidad, controla el régimen térmico en las losas y los esfuerzos asociados al alabeo y agrietamiento, climas despejados y con latitudes norte mostrarán mayor deterioro, la diferencia de temperatura diaria es un buen indicador de la magnitud del cambio en los gradientes térmicos de las losas y se relaciona directamente con los deterioros, climas con mayor oscilación térmica mostrarán mayor y más temprano agrietamiento. La temperatura del aire, directamente relacionada con la radiación solar incidente, resulta la variable que posee mayor correlación y es la más importante en los deterioros en pavimentos flexibles, lo que coincide con estudios anteriores, la precipitación es clave en los agrietamientos relacionados a fatiga de los materiales ligados con asfalto, los climas con precipitación anual promedio > 600 mm presentan por lo general mayor agrietamiento longitudinal y piel de cocodrilo.

7. Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por CONICYT, bajo el proyecto FONDECYT 11110255, los datos para la ampliación de la base climática, fueron proporcionados por Guillermo Navarro S. y Jorge Carrasco C. de la Dirección Meteorológica de Chile, su apoyo se agradece. Agradecimientos especiales a la Dirección Nacional de Vialidad y al Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.

8. Referencias

- [1] Zapata, Claudia Elena, et al. Incorporation of environmental effects in pavement design. Road Materials and Pavement Design, 2007, vol. 8, no 4, p. 667-693.
- [2] Ara, Inc, ERES Consultants Division. Part 2 Design Inputs, Chapter 3, Environmental Effects. Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements Structures. Final Report. Champaign, Illinois. 2004
- [3] DMC, Dirección Meteorológica de Chile. Guía Climática Práctica. Santiago, Dirección Meteorológica de Chile, 2008.
- [4] Úbeda, N. et al. "Desarrollo de Bases de Datos Climáticas Chilenas para Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos". Anales del 10º Congreso Internacional PROVIAL, Santiago, Chile, 8 al 11 de Octubre de 2012.
- [5] Delgadillo, Rodrigo, et al. Generating Hourly Climatic Data from Available Weather Information for Pavement Design. En Annual Meeting of the Transportation Research Board. 2014.
- [6] Zaghoul, Sameh, et al. Investigations of environmental and traffic impacts on mechanistic-empirical pavement design guide predictions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2006, vol. 1967, no 1, p. 148-159.
- [7] Johanneck, Luke; Khazanovich, Lev. Comprehensive evaluation of effect of climate in mechanistic-empirical pavement design guide predictions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, vol. 2170, no 1, p. 45-55.
- [8] Byram, Daniel, et al. Sensitivity Analysis of Climatic Influence on MEPDG Flexible Pavement Performance Predictions. En Transportation Research Board 91st Annual Meeting. 2012.
- [9] Qiao, Yaning, et al. Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life. En Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. 2013.

[10] Delgadillo, R., C. Wahr and J.P. Alarcon. "Towards the Implementation of the MEPDG in Latin America, Preliminary Work Carried Out in Chile". Transportation Research Record, No. 2226, p. 142-148, 2011.

8. Anexos

En el siguiente anexo se presentan los histogramas de las variables en estudio, para todas las estaciones climáticas comprometidas en el presente trabajo, por comodidad se han separado las 17 estaciones climáticas en 2 grupos. El grupo 1 contiene a los climas con estadísticas completas y el grupo 2 a los climas en donde la estadística fue rellenada [5], según esto los grupos quedan conformados como sigue:

Grupo 1 – Climas completos.

Arica
Antofagasta
La Serena
Valparaíso

Santiago
Concepción
Temuco
Puerto Montt
Punta Arenas
Grupo 2 – Climas rellenados.
Calama
Caldera
Curicó
Chillan
Los Ángeles
Valdivia
Osorno
Coyhaique

Los histogramas que se presentan en esta sección son los siguientes:

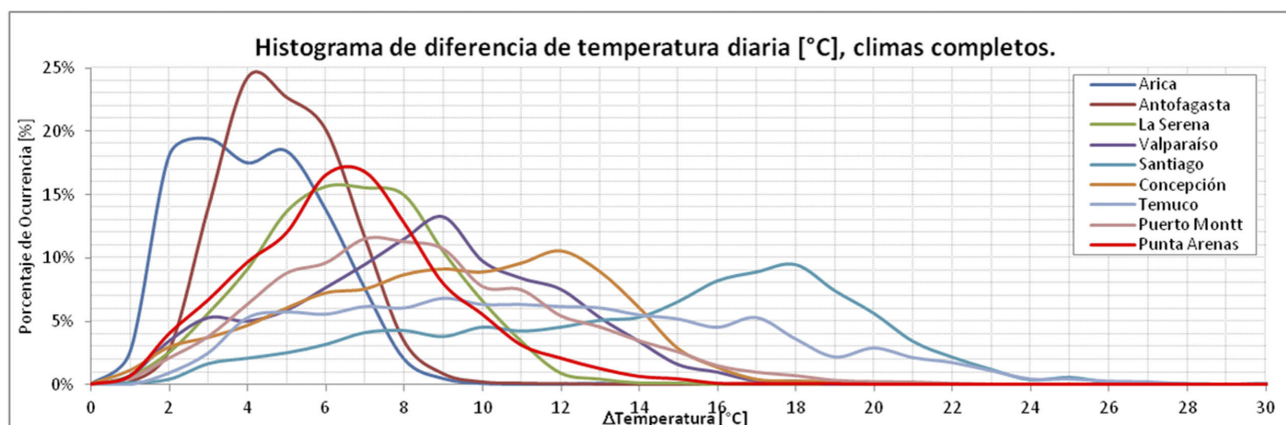
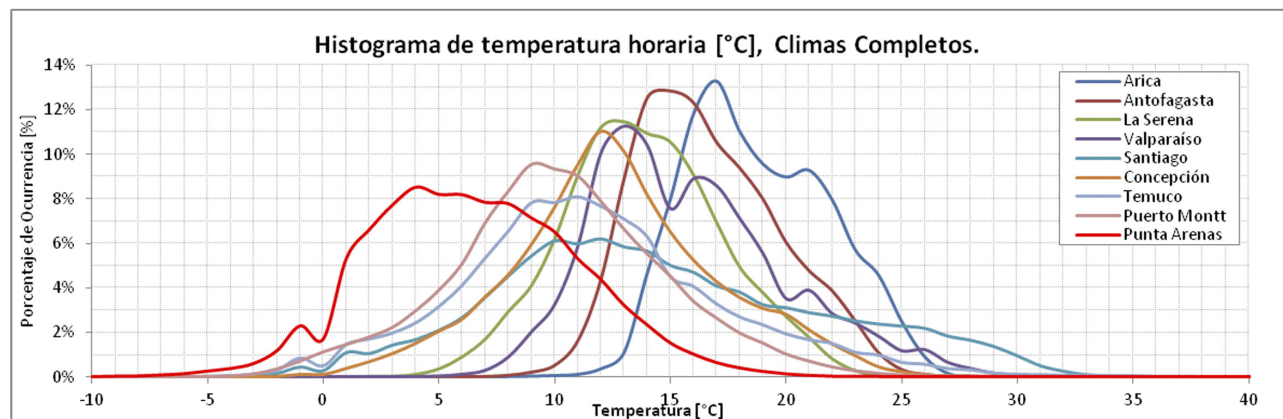
Temperatura horaria [°C].

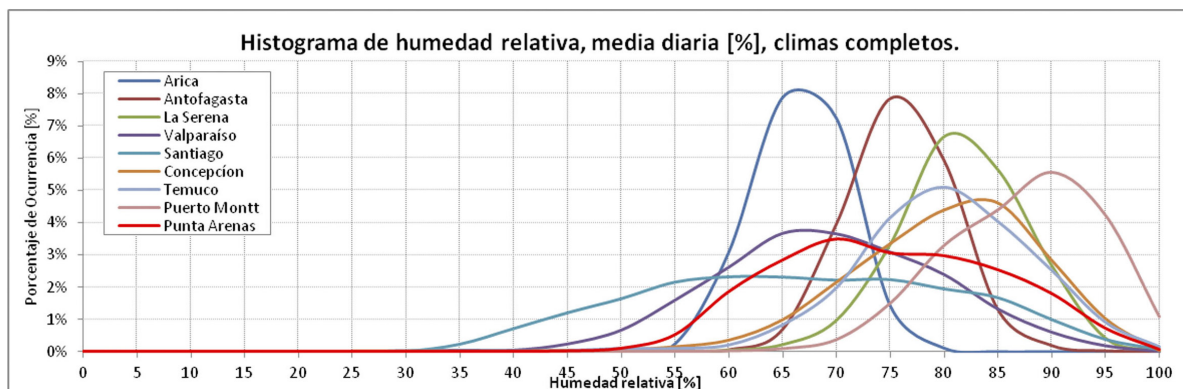
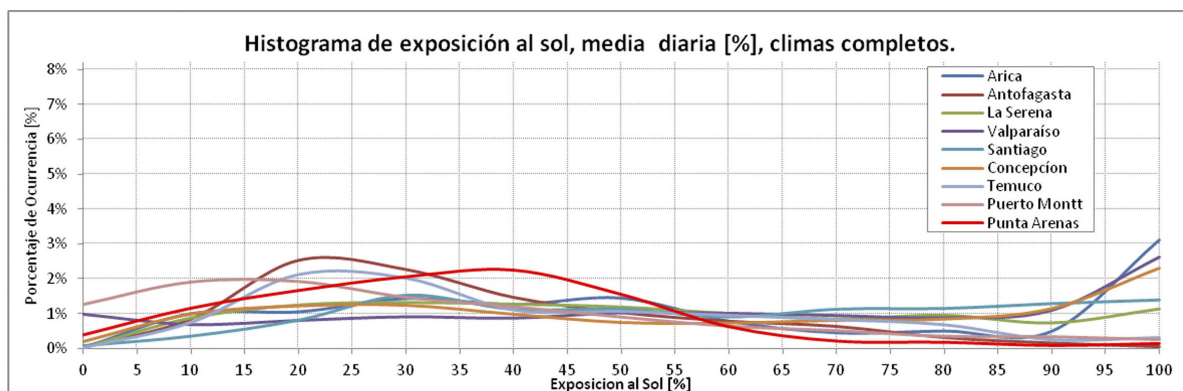
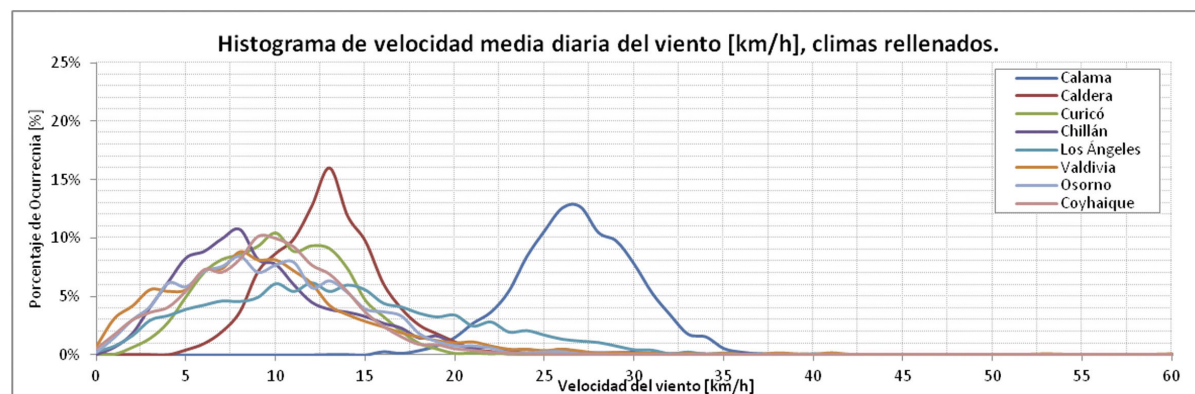
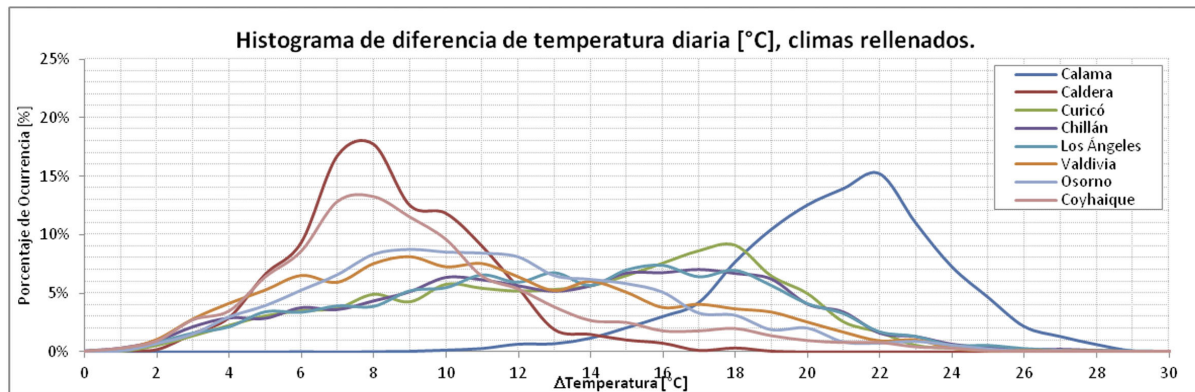
Diferencia de temperatura diaria [°C] (T Max – T Min).

Velocidad del viento, media diaria [km/h].

Exposición al sol, media Diaria [%].

Humedad relativa del aire, media diaria [%].







Determinación de la resistencia al corte de una arena limpia mediante ensayo de Dilatómetro Plano (DMT) Shear strength determination of clean sand with Flat Dilatometer Test (DMT)

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Mauro Poblete¹, Karen Leal¹

**¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
mauro@ucsc.cl, teléfono: 56-41-2345047, fax: 56-41-2345300**

Historial del
artículo:

Recibido
16-06-2015
Aceptado
19-11-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Arena Limpia
Dilatómetro Plano
DMT
Resistencia
al corte

Article history:

Received
16-06-2015
Accepted
19-11-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Clean Sand
DMT
Flat Dilatometer
Shear Strength

Resumen

El Dilatómetro Plano (DMT) es un equipo de exploración del terreno desarrollado en la década de los 70. Detrás de un principio de funcionamiento extraordinariamente sencillo, que consiste en inflar una membrana hasta alcanzar los 1,1 mm de deformación horizontal, existe la posibilidad de obtener valiosa información de las características del subsuelo su densidad, clasificación y los parámetros de resistencia al corte necesarios para modelar el suelo mediante modelos constitutivos como Hard Soil Model por ejemplo. Se presentan los resultados de un ensayo DMT realizado en una arena limpia. Se obtienen los parámetros de resistencia al corte y se comparan con los resultados obtenidos mediante ensayos de corte directo realizados a la misma arena.

Abstract

The Flat Dilatometer (DMT) is a in-situ exploration device developed in the 70's. The operating is simple. It is inflating a membrane to reach a horizontal deformation of 1,1 mm. Valuable geotechnical information can be obtained. Density, shear strength, and other parameters to model the soil by constitutive models for example Hard Soil Model. DMT results on a clean sand are presented. The shear strength parameters are obtained and compared with results of shear test performed of the same sand.

1. Introducción

El Dilatómetro Plano (DMT) fue desarrollado originalmente por Marchetti [1] y su utilización ha sido estandarizada por la ASTM [2] y por el Eurocode [3]. De los diferentes ensayos de penetración existentes, una de las principales ventajas del DMT es la de no requerir un sondeo previo, es un equipo portátil, de fácil utilización y que permite obtener resultados independientes del operador donde la repetitividad está garantizada [4].

El hecho de que sea un ensayo de carga lateral proporciona información inmediata de la rigidez del suelo. La distorsión ocasionada por la punta es menor para el DMT que para el Cone Penetration Test (CPT) [5]. Además permite obtener un índice de la historia de tensiones del terreno cuyo conocimiento es de sumo interés porque influye en el comportamiento del mismo [6].

El ensayo de dilatómetro consiste en penetrar una hoja plana ubicada al final de una serie de barras, mediante un equipo de penetración similar a los utilizados en ensayos SPT y CPT.

Una vez alcanzada la profundidad de ensayo requerida, la membrana circular delgada de acero que se ubica a un lado de la hoja, se infla, desplazándose horizontalmente contra el terreno, como se ilustra en la Figura 1. Esta expansión se efectúa mediante cualquier gas no inflamable, no tóxico, siendo el nitrógeno comprimido y el Oxígeno los más utilizados [4].

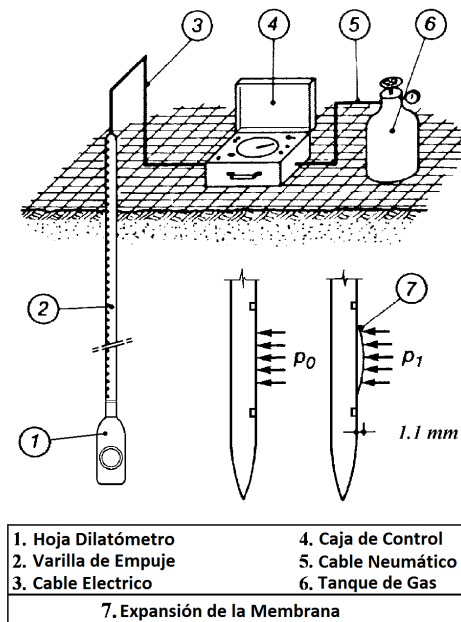


Figura 1. Esquema de ejecución de ensayo DMT. [4]

Una gran variedad de suelos se pueden investigar mediante el equipo DMT. Desde los suelos extremadamente blandos, hasta suelos densos e incluso rocas blandas [4]. El DMT resulta adecuado para arenas, limos y arcillas, cuyas partículas son pequeñas comparadas con el diámetro de la membrana de 60 mm. No se recomienda su utilización para grava y roca. Sin embargo, la hoja es lo suficientemente resistente para atravesar capas de grava con un espesor del orden de 0,5 m.

El DMT es un ensayo de exploración del terreno cuyo uso se encuentra extensamente documentado y se extiende a lo por mas de 50 países alrededor del mundo.

Se muestra a continuación el método de análisis de los resultados obtenidos en terreno y la formulación necesaria llegar a obtener a partir de dichos resultados los parámetros de interés ingenieril. Luego y a modo de ejemplo se presentan resultados de un ensayo realizado en una arena limpia de finos hasta una profundidad de 12 m para el cual se obtiene la variación del ángulo de fricción con la profundidad. Dicho resultado se compara con el resultado del ángulo de fricción obtenido mediante ensayos de corte directo tradicionales realizados a muestras remoldeadas de la misma arena.

2. Datos medidos, parámetros intermedios y correlaciones

Para obtener la resistencia al corte en terreno mediante el ensayo DMT se deben procesar las presiones de inflado p_0 y p_1 (Figura 1), que se obtienen en terreno.

2.1. Datos medidos

En terreno y mediante una serie de señales audibles de la caja de control (Figura 1), el operador obtiene las presiones de “cero deformación de la membrana (lectura A) y máxima deformación de la membrana (lectura B) como se muestra en el esquema de la Figura 2.

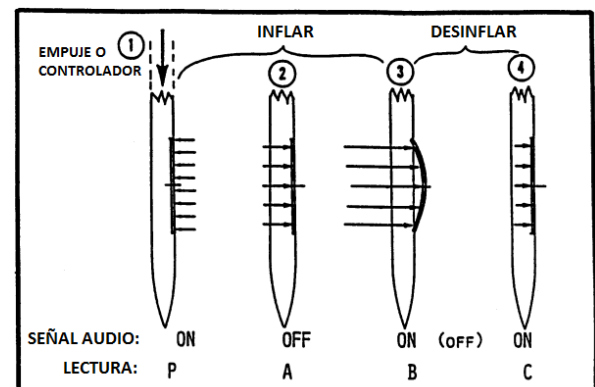


Figura 2. Lecturas durante la secuencia de ensayo DMT

Los datos (A y B) medidos en terreno para las diferentes profundidades debencorregirse por la rigidez de la membrana para determinar las presiones p_0 y p_1 de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2.

$$p_0 = 1.05(A - Z_m + \Delta A) - 0.05(B - Z_m - \Delta B) \quad (1)$$

$$p_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (2)$$

Dónde:

$\Delta A, \Delta B$: Corresponden a las correcciones por la calibración de la membrana que se realiza antes y después de cada ensayo en condiciones controladas.

Z_m : Desviación del cero debida a la presión atmosférica.

2.2. Parámetros intermedios

A partir de los valores corregidos de p_0 y p_1 se pueden calcular los 3 parámetros intermedios del ensayo DMT:

El índice de material ID

El índice de esfuerzo Horizontal KD

El módulo del dilatómetro ED

El índice de material (3) está relacionado con el tipo de suelo y permite clasificarlo desde el punto de vista del comportamiento mecánico del medio. A pesar de que pueden presentarse algunas diferencias con los resultados obtenidos de un análisis granulométrico de todas formas una clasificación basada en el comportamiento mecánico muchas veces puede resultar más útil que la clásica clasificación por tamaño de las partículas utilizada en laboratorio. Por ejemplo, para el caso de arcillas de diferentes rigideces, el parámetro intermedio ID clasificará como limo a las que presenten una mayor rigidez. Esta caracterización, si bien es incorrecta desde un punto de vista del tamaño de las partículas, puede llegar a ser relevante desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (3)$$

De acuerdo a [1] los valores de ID oscilan entre 0,1 y 10 y la clasificación obtenida a partir de dicho parámetro es:

Arcilla	$0,1 < ID < 0,6$
Limo	$0,6 < ID < 1,8$
Arena	$1,8 < ID < 10$

El índice de esfuerzo horizontal depende de la tensión efectiva horizontal y se relaciona con la razón de sobreconsolidación (OCR) y permite entender la historia de tensiones del suelo [1 y 7].

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

El módulo DMT, ED se obtiene a partir de la teoría de la elasticidad. Sin embargo es un parámetro que por si mismo no debe utilizarse

como un módulo de deformación por la falta de información de la historia tensional. Por lo tanto debe utilizarse en combinación con KD e ID. No se debe confundir con el módulo de Young [4].

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0)(4)$$

2.3. Parámetros geotécnicos

A partir de los parámetros intermedios presentados en 2.2 se pueden obtener rápidamente otros parámetros de interés en geotecnia y que permiten determinar la resistencia, deformabilidad e historia de tensiones de un suelo. Estos parámetros son los siguientes:

Peso unitario y estratigrafía

OCR y K_0 en arcillas

Cu en suelos cohesivos

ϕ y D.R. en suelos granulares

MDMT (módulo edométrico) en suelos granulares y cohesivos

El peso unitario y la estratigrafía o tipo de suelo se determinan a partir de ID y ED mediante el ábaco que se muestra en la figura 3, desarrollado por Marchetti y Crapps [8].

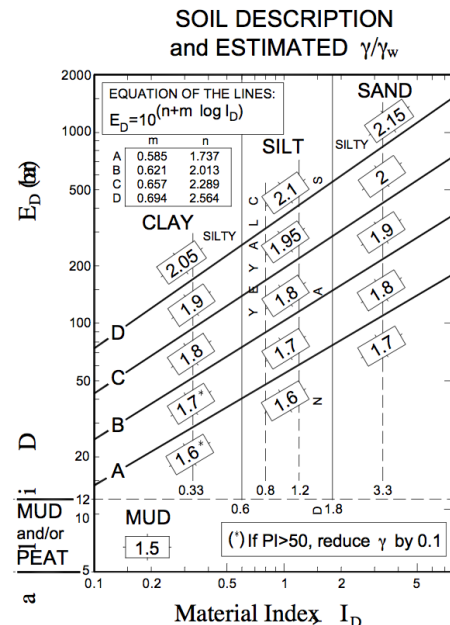


Figura 3. Ábaco para estimar el tipo de suelo y el peso unitario desarrollado por Marchetti y Crapps[8]. Las líneas A, B, C, D establecen fronteras entre los diferentes pesos unitarios. El índice de material establece los límites entre uno u otro tipo de suelo. Las cifras dentro de los rectángulos son el peso unitario aproximado del suelo en T/m3. Si $PI > 50$ las cifras en esta zona están sobredimensionadas en 0,10 T/m3.

El objetivo principal de este ábaco no son las estimaciones precisas del peso unitario, pero si la posibilidad de construir un perfil aproximado la tensión efectiva horizontal. El uso de este ábaco es se recomienda solamente sino se tiene información clara del sitio. Para el resto de los casos es recomendado estimar el peso unitario con los datos propios del lugar.

Los parámetros relacionados con suelos cohesivos se pueden encontrar en [4].

Para el caso de suelos granulares se puede determinar el ángulo de fricción ϕ mediante dos métodos.

El primero [9] proporciona estimaciones simultaneas de ϕ y K_0 mediante la teoría de Durgunoglu y Mitchell, o utilizando el ábaco propuesto por Marchetti [9] de la figura 4, el cual permite estimar ϕ a partir de K_0 y la resistencia de punta q_c determinada a partir de Cone Penetration Test (CPT).

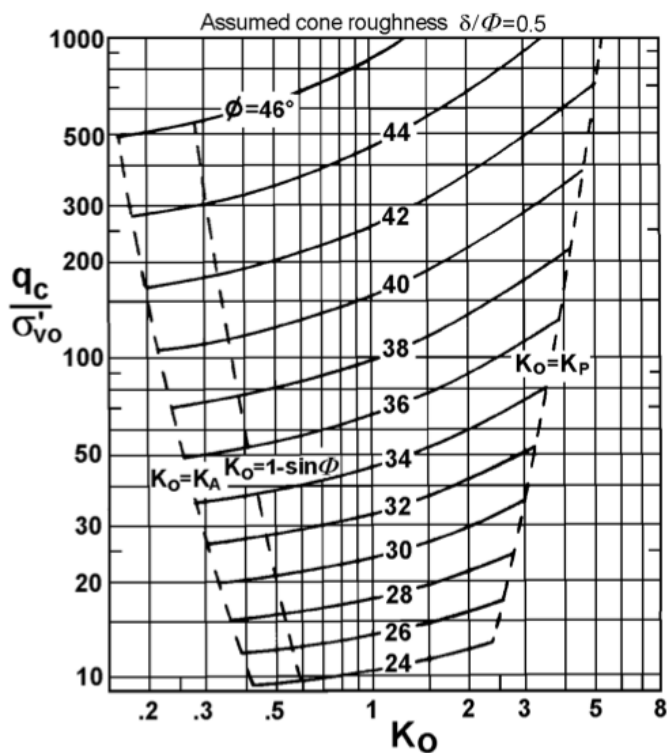


Figura 4. Ábaco $q_c - K_0 - \phi$. Equivalencia gráfica a partir de la teoría de Durgunoglu y Mitchell (propuesto por Marchetti [9]). Las líneas individuales para cada valor específico de ϕ presentan un límite inferior para K_0 establecido por el coeficiente activo de Rankine K_A y el límite superior dado por la condición pasiva K_P .

El segundo método se explica detalladamente en [10] y consiste en obtener ϕ a partir de la ecuación que se muestra en la figura 5. Este resultado es de carácter conservador.

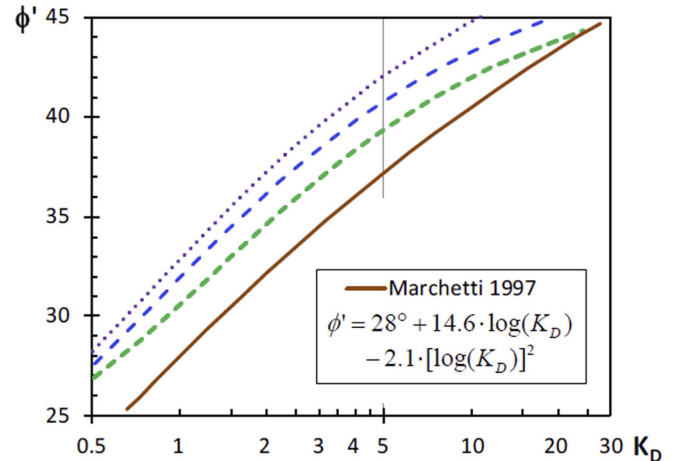


Figura 5. Determinación de ϕ a partir de K_D [10]

La densidad relativa D.R. también se puede determinar a partir de K_D usando el ábaco de la Figura 6 válido para arenas no cementadas [11].

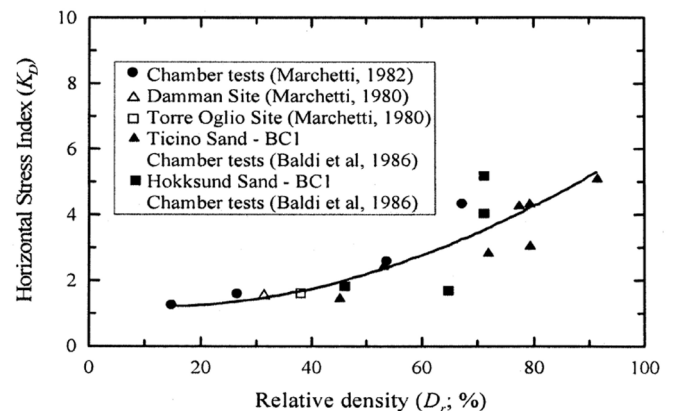


Figura 6. Densidad relativa D.R. a partir de K_D [11]

Finalmente el módulo edométrico MDMT corresponde al módulo vertical drenado (unidimensional) tangente a la presión de confinamiento σ'_{vo} del ensayo y equivale al determinado en el edómetro. La posibilidad que ofrece el ensayo DMT de determinar este parámetro en su estado confinado es uno de los principales aportes del ensayo.

El MDMT se obtiene a partir del parámetro intermedio E_D y un factor de corrección denominado R_M de acuerdo a 3.

$$M_{DMT} = E_D R_M \quad (5)$$

La Tabla 1 muestra las ecuaciones que definen R_M , donde se observa que R_M se encuentra en función de I_D y K_D . Además el valor de R_M aumenta con el aumento de K_D .

Si $I_D \geq 0.6$	$R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$
Si $I_D \geq 3$	$R_M = 0.5 + 2 \log K_D$
Si $0.6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ con $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$
Si $K_D > 10$	$R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$
Si $R_M < 0.85$	ajustar $R_M = 0.85$

Tabla 1: Determinación de R_M

3. Resultados de ensayo DMT

Se realiza un ensayo DMT en un depósito de arena limpia de finos. La curva granulométrica así como los valores del coeficiente de uniformidad CC , de curvatura CCU , la gravedad específica G_s y la clasificación $USCS$ se indican en la Figura 7.

El ensayo se realiza hasta una profundidad de 12 m obteniendo datos cada 2 m aproximadamente.

La Figura 8 resume los resultados obtenidos del ensayo, los cuales fueron corregidos y calculados de acuerdo a las ecuaciones y ábacos presentados en la sección anterior.

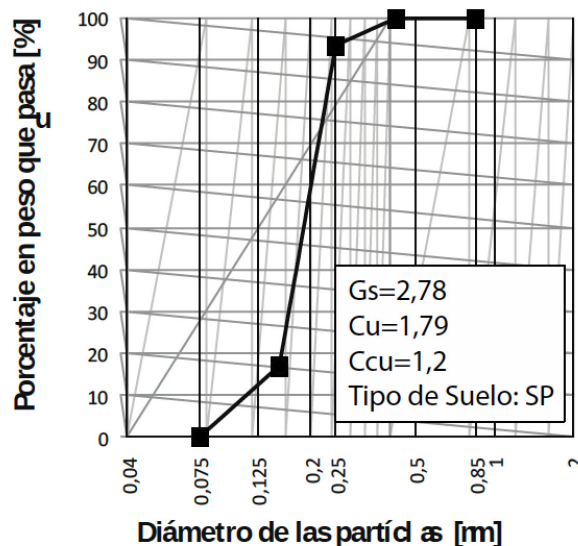


Figura 7. Curva granulométrica y propiedades de la arena estudiada.

En la Figura 8 se aprecia que los valores de p_0 y p_1 se incrementan con la profundidad así como la diferencia entre ambos ΔP . El factor K_D se mantiene relativamente constante en valores alrededor de 2.

Se observa también que los valores de I_D son mayores que 1,8 por lo que de acuerdo al comportamiento mecánico del material estamos en presencia de arena en toda la profundidad. Los valores de E_D y M_{DMT} son prácticamente idénticos debido a que el factor de corrección R_M es cercano a 1.

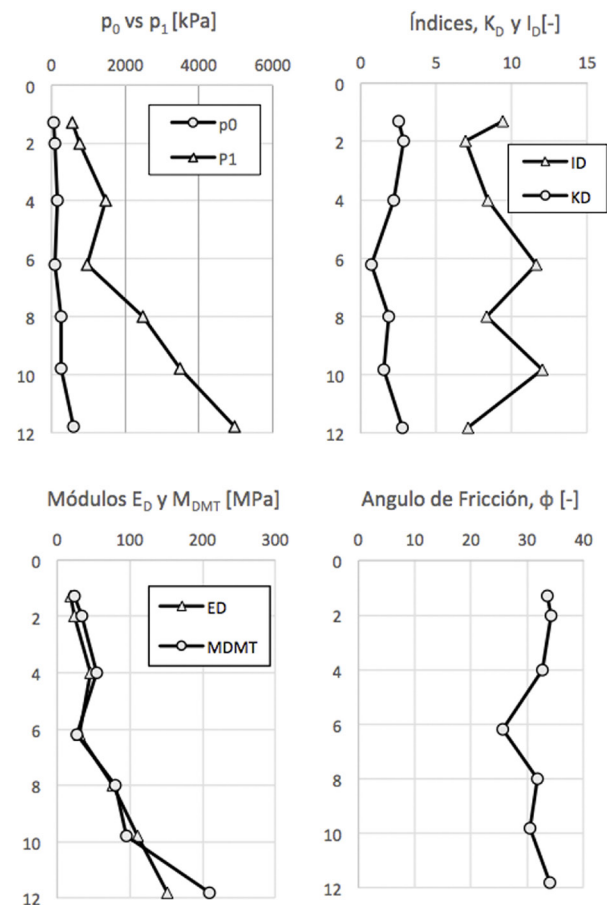


Figura 8. Resultados ensayo DMT en arena limpia

El ángulo de fricción se obtiene utilizando el segundo método presentado en la sección anterior [10] obteniendo valores conservadores de ϕ que varían entre los 26 y los 34 grados.

Adicionalmente se realizan ensayos de corte directo a muestras remoldeadas a diferentes presiones normales. La Figura 9 muestra estos resultados obteniendo un ángulo de fricción residual de 32 grados.

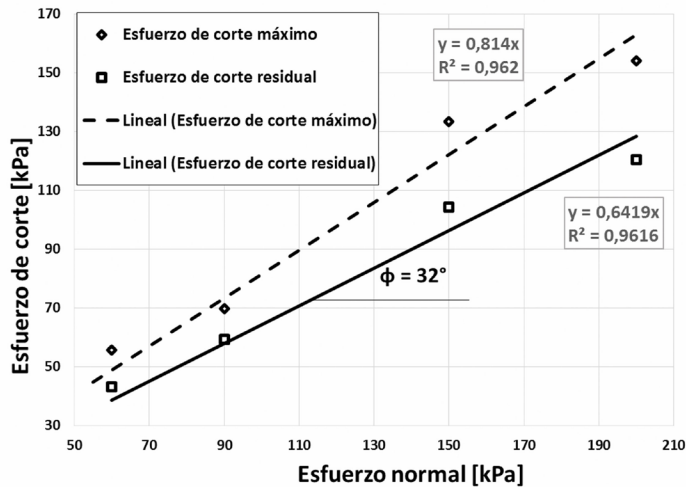


Figura 9. Resultados ensayo de corte directo en arena limpia

4. Observaciones y conclusiones

Se presenta el ensayo de Dilatómetro Plano (DMT) y se describen su funcionamiento y características principales. Se destacan la facilidad y ventajas que presenta frente a otros ensayos de exploración del subsuelo. Se enumeran y explican los parámetros medidos en terreno p_0 y p_1 , los parámetros intermedios I_D , K_D y E_D , y los parámetros geotécnicos que se pueden obtener a partir de correlaciones de los anteriores. Se presentan los resultados de un ensayo realizado en un depósito de arena limpia y se comparan con los resultados de un ensayo de corte directo realizado a muestras remoldeadas en laboratorio observándose que el resultado del ensayo DMT es una buena aproximación al momento de obtener el ángulo de fricción del material. El Dilatómetro Plano DMT es una excelente herramienta que permite obtener resultados confiables y rápidos de la resistencia al corte que en el futuro será utilizada con mayor frecuencia gracias a las ventajas que presenta.

5. Referencias

- [1] Marchetti, S. 1980. In Situ Tests by Flat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 106, Nº GT3, Proc. Paper 15290, p 299-321.
- [2] ASTM D6635. 2001 y 2007. Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer. Book of Standards, 14pp.
- [3] Eurocode 7 EN 1997-2:2007. 1996 y 2007. Geotechnical Design – Part 2: Ground Investigation and Testing.

[4] TC16. 2001. The DMT in soil investigations. A Report by the ISSMGE Committee TC16, pp 41

[5] Baligh, M.M. y Scott, R.F. 1975. Quasi Static Deep Penetration in Clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division 101, No. 11, 1119-1133

[6] Marchetti, S., Marchetti, D. Y Villalobos, F. 2013. El Dilatómetro Sísmico SDMT para ensayos de suelos in situ. Obras y Proyectos 13, 20-29

[7] Baldi, G., Bellotti, R. Ghionna, V. Y Jamiolkowski, M. 1988. Stiffness of Sands from CPT, SPT and DMT. ICE Proc. Penetration Testing in the UK, Univ. Of Birmingham, Paper No. 42, 299-305. July.

[8] Marchetti, S. y Crapps, D.K. (1981). Flat Dilatometer Manual. Internal Report of G.P.E. Inc

[9] Marchetti, S. 1985. On the Field Determination of K_0 in Sand. Discussion Sesión No. 2ª, Proc. XI ICSMFE, S. Francisco, Vol. 5, 2667–2673

[10] Marchetti, S. 1997. The Flat Dilatometer: Design Applications. Proc. Third Int. Geotechnical Engineering Conference. Cairo University, Keynote lecture. 421-448

[11] Reyna F. y Chameau J.L. 1991. Dilatometer Based Liquefaction Potential of Sites in the Imperial Valley. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geot. Earthquake Engrg. And Soil Dyn. St. Louis. May



Evaluación de la influencia del flujo hiporréico en el transporte de solutos mediante el uso de un modelo numérico

Evaluating the influence of hyporheic flows on solute transport using a numerical model

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Angel Monsalve ¹

Historial del
artículo:

Recibido
30-07-2015
Aceptado
19-11-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Transporte de
solutos
Flujo hiporreico
Zona muerta
OTIS

Article history:

Received
30-07-2015
Accepted
19-11-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Solute transport
Hyporheic flows
Dead zones
Otis

¹Center for Ecohydraulics Research, University of Idaho, Boise, Idaho, United States
angelmonsalve@gmail.com, phone: +1-208-284-2293

Abstract

El transporte de solutos en cuerpos fluviales es afectado por múltiples mecanismos y procesos que incluyen la morfología del río, fenómenos de turbulencia, re-aireación y área de almacenamiento temporal tales como zonas de recirculación, flujos hiporreicos y zonas muertas. La zona hiporréica es un ecotono activo entre el flujo superficial y el agua subterránea. En la zona vadosa se producen importantes intercambios de agua, nutrientes y material orgánico, los cuales son función de las variaciones de descarga, así como también de propiedades del lecho del río como la topografía y porosidad. Es en esta zona donde masas de agua experimentan un intercambio continuo entre el cauce principal y aquel proveniente de la sub-superficie del lecho del río, lo que hace que la zona hiporréica funcione como un set de puntos continuos que conectan el cauce principal de un río y su cuenca. La zona muerta es aquella región de un río donde el agua está estancada o tiene una velocidad mucho menor que el cauce principal, como por ejemplo la zona más profunda de pozones o el flujo que escurre a través de vegetación densa. Junto a la zona hiporréica las zonas muertas controlan la calidad del agua, por ejemplo afectando la concentración de oxígeno disuelto, lo que se influye directamente en el hábitat disponible de especies acuáticas y ribereñas. Para evaluar la influencia, efectos e importancia de la zona hiporréica en el transporte de solutos se realizó una campaña en terreno, donde una serie de descargas de Rodamina fueron medidas en diferentes ubicaciones a lo largo de un tramo de 271 m en el río Bear Valley Creek, ubicado en el estado de Idaho, Estados Unidos. El análisis de las zonas de flujo hiporreico y muertas se realizó usando el modelo OTIS (One-Dimensional Transport with Inflow and Storage, USGS), el cual se basa en los procesos de advección y dispersión y que además incluye el almacenamiento temporal y decaimiento de los solutos. Los resultados del modelo muestran que las zonas de almacenamiento temporal, en este caso zonas muertas y flujo hiporreico deben ser explícitamente incluidas a la hora de hacer predicciones del comportamiento del transporte de solutos en cuerpos fluviales que presentan algún grado de permeabilidad en su lecho.



INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
30-07-2015
Aceptado
19-11-2015
Publicado

Palabras Claves:
Transporte de
solutos
Flujo hiporreico
Zona muerta
OTIS

Article history:

Received
30-07-2015
Accepted
19-11-2015
Available

Keywords:
Solute transport
Hyporheic flows
Dead zones
Otis

Abstract

Transport of solutes in streams are affected by multiple mechanisms and processes that include river morphology, turbulence, reaeration, and transient storage areas which include re-circulation zones, hyporheic flows and dead zones. The hyporheic zone is an active ecotone between the surface stream and groundwater. In this zone important exchanges of water, nutrients, and organic matter occur in response to variations in discharge and bed topography and porosity. Is in this zone where water that is flowing in the stream channel flows into the subsurface materials of the streambed and then returns to the main stream, making the hyporheic zone a continuous link between the stream's channel and catchment. The dead zone is defined as a region of static or slowly moving water (i.e. backwater eddies, stagnant water at the bottom of pools, and flow through vegetation). Dead and hyporheic zones play a key role in controlling the water quality, for instance affecting the stream dissolved oxygen concentration, which ultimately controls the habitat suitability for a number of aquatic and riparian species. To evaluate the influence, effects and importance of hyporheic zone in the transport of solutes a field campaign was conducted, where a series of Rhodamine injections were monitored in along a 271 m reach in Bear Valley Creek, ID, USA. The analysis of the dead zones and hyporheic flows was performed using the OTIS Model (One-Dimensional Transport with Inflow and Storage, USGS) where the governing equation underlying the model is the advection-dispersion equation with additional terms to account for transient storage, and first-order decay. Results showed that the including transient storage areas, in this case hyporheic and dead zones must be explicitly included in order to describe how solutes are transported in a stream whose bed present some degree of permeability.

1. Introduction

Transport of solutes in rivers and streams is affected by retention of the solutes in transient storages, where temporal isolation of the solutes from the main channel in stagnant water zones such as pools, dead-end side channels or adjacent wetland areas happens (De Smedt, 2007 [1]). This can cause that a large amount of water and solute is interchanged within the dead zone, which are regions of static or slowly moving water (i.e. backwater eddies, stagnant water at the bottom of pools, flow through vegetation), and the hyporheic zone, causing a delay of the solute migration and a skewed concentration profile in the main channel that may differs from that of a classic mathematical formulation of advection-dispersion processes. The dead zone is characterized by a low oxygen content (hypoxic), caused primarily by eutrophication, which is a process where an increase of in-stream chemical nutrients exists (e.g. nitrogen and phosphorus). They also play a key role in water quality dynamics, for instance controlling the in-stream dissolved oxygen concentration and habitat suitability for many riverine and riparian species.

Winter et al., (1998) [2] defines the hyporheic exchange flow as one of several mechanisms of the interaction between the groundwater and surface water. In the hyporheic zones of streams, water that is flowing in the stream channel flows into the subsurface materials of the streambed and then returns to the stream. Hyporheic zones function as a link between the stream's channel and catchment allowing a permanent interchange of water and solutes (Bencala, 1984 [3]). As a region of transition from the stream to the surrounding aquifer, the hyporheic zone has been identified as a critical component of the stream ecosystems, although still is less understood than surface flow. Hyporheic mixing occurs via circulation cells that move river water into the alluvium (downwelling) and back again (upwelling) (Tonina and Buffington, 2009 [4]) and ultimately affects the channel geomorphology and groundwater and riverine habitat for aquatic and terrestrial organisms (Bencala, 2000 [5]; Vaux, 1962 [6]). Sharp gradients in physical, chemical, and biological conditions produce an extreme diversity of natural processes in the hyporheic zone that do not occur anywhere else in the overlying stream or underlying aquifer. As a result, fluxes through the hyporheic zone tend to influence a very wide range of ecologically relevant substances, including nutrients, carbon, and contaminants (Brunke and Gonser, 1997 [7]; Winter et al., 1998 [2]; Jones and Mulholland, 2000 [8]). Upwelling subsurface water supplies stream organisms with nutrients while downwelling stream water provides dissolved oxygen and organic matter to microbes and invertebrates in the hyporheic zone.

To understand how the hyporheic flows and dead zones affects the transport of solutes several models have been formulated, usually considering the advection-dispersion processes coupled with

a mass exchange module. Transient storage can be included by means of two parameters, a mass exchange rate coefficient and the volume or cross sectional area of the transient storage zone (Runkel et al., 2003 [9]). One example of this type of models is the OTIS model (Runkel and Chapra, 1993 [10]), developed by the USGS and the Transient Storage Model (TSM) (Bencala, 2006 [11]), which is the one used in this study. OTIS uses an approximate finite difference solution of advection-dispersion equations and it has been extended with a parameter optimization technique, OTIS-P, to estimate transient storage characteristic in rivers [see for example Choi et al., 2000 [12]; Lees et al., 2000 [13], Fernald et al., 2001 [14]; Laenen and Bencala, 2001 [15]; Keefe et al., 2004 [16]; De Smedt et al., 2005 [17]]. The importance of including transient storage is analyzed using Rhodamine injections in a 271 m long reach of the Bear Valley Creek. Here it is hypothesized that the importance of the transient storage zone can be indirectly estimated by the ratio cross-sectional area of the storage zone to the main channel cross-sectional area. A specific threshold for this ratio has not been established but it is assumed that if both are in the same order of magnitude the storage zone plays an important role in controlling the dynamic of the solute transport.

2. Study Site

The study was conducted in Bear Valley Creek, a headwater tributary to the Middle Fork of the Salmon River watershed in central Idaho (Figure 1).

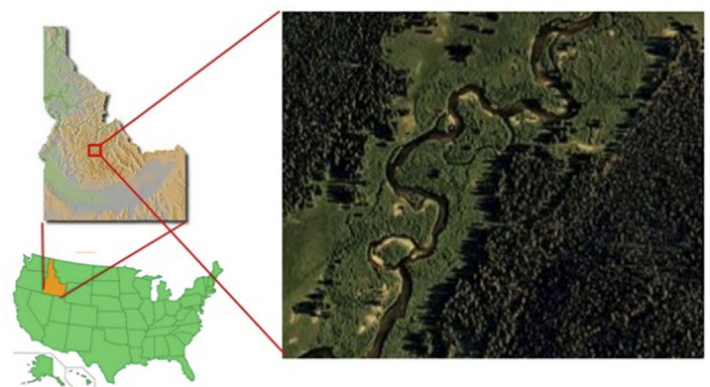


Figure 1: Location of the study site

According to Richards and Bacon, (1994) [18] the stream flows through subalpine meadows and lodgepole pine forest on a granitic batholith. Alluvial deposits of erosive sandy soils typify the region. Stream substrates have high proportions of fine sediments in many areas as a result of both point and non-point sources along

the length of the stream (Konopacky et al., 1986 [19]). The field site is located in the coordinates Lat: 44.3774° and Long:-115.392° and the study reach length is about 271 m. In this specific location the river features sharp bends and a relatively large and flat flood-plain (Figure 2).

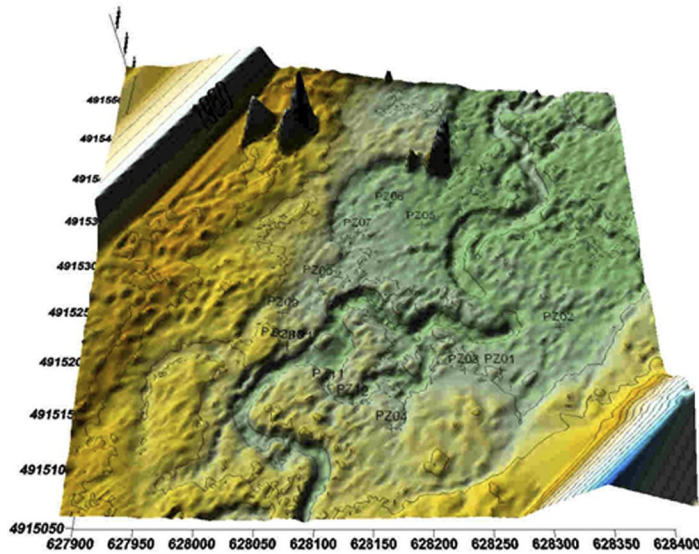


Figure 2: Bed Surface elevation at the study site. Coordinates are shown in UTM, vertical is North and horizontal is East

3. Methods

3.1 Field Measurements

During August 2011 a series of Rhodamine injections were performed in the study site. Concentrations of Rhodamine were measured in two locations, at 143.45 and 271.34 m starting from the injection place. Measurements started before the injection and finishing long time after the concentration did not exhibit significant change and its value was practically equal to zero. The Rhodamine tracer has been used in several studies as it is a conservative solute. The river model considers a 127.9 m reach length, where the upstream boundary ($x=0$ m in the model) is located where the first Rhodamine measurement was taken ($x'=143.45$ m, where ' denotes the original coordinate system) and the downstream end ($x=127.9$ m, $x' = 271.34$ m) is where the second measurement was taken. The first location ($x = 0$ m) was chosen to allow the river to well mix the Rhodamine with the original flow. All measurements were corrected by temperature. The model was set as time=0 hrs when the injections were executed in order to make an easier comparison (Figure 3). Because of the correction for temperature in the measured concentrations, there were some values that exhibited negative concentrations, which is physically impossible. In those cases the corrected values were set equal to zero. The reach cross sectional area and mean discharge were 3.27 m² and 0.927 m³/s respectively and they were obtained by averaging the

cross sections, specifically where the Rhodamine was injected and measured ($x = 0, 143.45$ and 271.34 m). The discharge exhibited some grade of variation (-0.04 to $+0.06$ m³/s from the mean value) in the three locations while it was measured. For the purpose of this work the mean discharge (0.927 m³/s) is a good representation for the studied reach.

Inputs required by OTIS and OTIS-P (see section 3.3) were taken from the measured curve and interpolated linearly every 0.02 hrs in the upstream end and 0.04 in the downstream. This difference in the time step is due to the requirements of OTIS and OTIS-P.

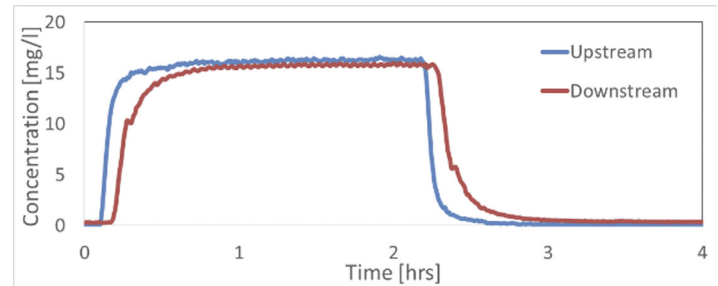


Figure 3: Measured Rhodamine concentration at the upstream and downstream ends.

3.2 The OTIS Model

A brief summary of the OTIS model is described below, for further details see Runkel (1998) [20]. OTIS solves a set of equations that describe the physical processes of advection, dispersion and transient storage. Two conceptual areas are defined within the model: (i) the main channel is defined as the portion of the stream in which advection and dispersion are dominant mechanisms, and (ii) the storage zone is the portion of the stream that contributes to transient storage (i.e. hyporheic zone, pools and eddies). The exchange of solute mass between the main channel and the storage zone is modeled as a 1st-order mass transfer process (Runkel, 2002 [21]).

The spatial and temporal variations in solute concentration are given by:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (C_L - C) + \alpha (C_L - C) - \lambda C \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{dC_S}{dt} = \alpha \frac{A}{A_S} (C - C_S) - \lambda_S C_S \quad \text{Eq. 2}$$

where A is the main channel cross-sectional area (m^2), A_s is the cross-sectional area of the storage zone (m^2), C is the main channel solute concentration (mg/L), C_s is the storage zone solute concentration (mg/L), C_l is the lateral inflow solute concentration (mg/L), D is the dispersion coefficient (m^2/s), Q is the volumetric flow rate (m^3/s), q is the lateral inflow rate on a per length basis ($m^3/s/m$), t is time (s), x is distance (m), λ is the storage zone exchange coefficient (s^{-1}), λ_c the main channel first-order decay coefficient (s^{-1}) and λ_s the storage zone first-order decay coefficient (s^{-1}). Solutions for Eq. 1 and Eq. 2 are based on a numerical solution using Finite Differences and the well-known Crank-Nicolson Method. For more details on the numerical strategy to solve the set of equations Runkel (1998) [20].

3.3 OTIS-P

According to Runkel (1998) [20] one of the goals in many solute transport studies is that of parameter estimation; given a set of observed concentrations, determine a set of parameters values that aptly describes the system under the study. The OTIS model is distributed along with OTIS-P, a model that uses a parameter-estimation technique known as Nonlinear Least Squares (NLS) that automatically determine a set of optimal parameter estimates that tries to match simulated and measured solute concentrations. Specifically, OTIS-P determines an optimal set of parameter estimates that minimize the squared differences between the simulated and observed concentrations, thereby automating the parameter estimation process. For more details see Runkel (1998) [20]. OTIS-P is relatively quick, compared to a manual iteration, although care must be taken with the selection of both initial guessed values and the final solution in order to be inside a realistic range of values. OTIS-P was used to obtain a first approximation of the optimal set of parameters, in this case D, A_s, α, λ , and λ_s . The full parameter estimation of OTIS-P can modify up to 10 parameters. Once OTIS-P found a solution the influence of this set of parameters was analyzed varying independently some of them.

3.4 Parameter Estimation

In this study 5 parameters of OTIS and OTIS-P models were estimated to match the predicted and measured concentration at the downstream end (located at 271.34 m). Two set of runs were performed until the predicted concentration matched the measured one and also the parameter values given by OTIS-P remained constant. In the first set of run the dispersion coefficient (D), storage zone cross-sectional area (A_s), and exchange coefficient (α) were allowed to change while main channel first-order

decay coefficient (λ) and storage zone first-order decay coefficient (λ_s) were fixed. After they converged to a solution with values inside a physically feasible range the second set of runs was performed, this time fixing $D, A_s, (\alpha)$ and varying λ and λ_s .

In the first set of runs (variable: D, A_s, α ; fixed: λ, λ_s) D, A_s and α were set as $10 m^2/s$, $0.1 m$ and $0 s^{-1}$ respectively. Notice that λ_s can't be set equal to zero otherwise the model is bad conditioned. $D = 10 m^2/s$ was estimated using the values and shape (in time) of the concentration in the downstream end and the approximation $D = 0.5 x t_{peak}^{-1}$, where t_{peak} is the time where the peak concentration was measured. After the solution converged, the remaining 2 parameters (λ and λ_s) were calibrated, this time using the calibrated set of D, A_s, α .

4. Results

4.1 Transient storage modeling

After the calibrations was completed the set of parameters that best describe the measured concentration in the Bear Valley Creek was: $D = 5.28 m^2/s$, $A_s = 1.75 m^2$, $\alpha = 2.44 \cdot 10^{-4} s^{-1}$, $\lambda = 9.44 \cdot 10^{-6} s^{-1}$, and $\lambda_s = 1.79 \cdot 10^{-5} s^{-1}$. Under these conditions the predicted concentration, calculated with OTIS, and the measured one showed a fairly accurate match (Figure 4). The coefficient of determination was $R^2 = 0.999$. Goodness of fit is summarized in Table 1.

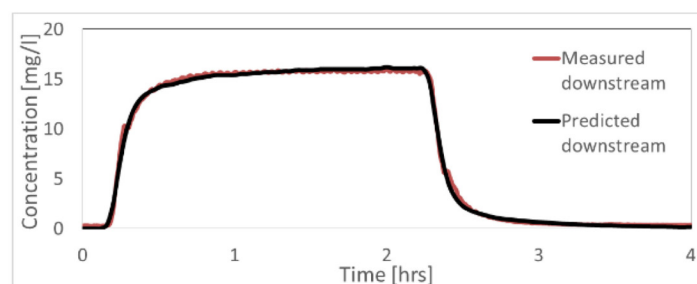


Figure 4: Predicted and measured Rhodamine concentration at the downstream point.

RMSE	0.2816 mg/l
R^2	0.9985
Nash efficiency coefficient	0.9985
Absolute error	0.2132 mg/l

Table 1: Goodness of fit in the downstream point

The cross-sectional area of storage is almost a half of that of the main channel which indicates that this component is really important in the transport of solute within this reach of the Bear Valley Creek and suggests that hyporheic and dead zones play an important role in the dynamics of solute transport.

5. Results and Discussion

Model results shows that the use of a simple advection-dispersion formulation under these river conditions is not a realistic assumption and will give erroneous results, which could lead to negative consequences if decisions were taken considering this scenario. Including storage areas allow to have a better representation of the mechanics of the solute transport and the processes that affect it. OTIS, a fairly simple, physically based, numerical model that accounts for the main processes that occurs within a stream, is a very useful tool to predict how solutes are being transported and also how are affected by some external processes. Although in this area Bear Valley Creek features meanders and sharp curves (Figure 1) this one dimensional model accurately predicted the transport of a conservative tracer (Figure 4, Table 2), suggesting that the main and most important processes in the solute transport problem are being considered.

The storage zone in this section of the Bear Valley Creek is controlled mainly by D , A^s , α , λ , and λ_s . Interchange of solutes between the main channel and the transient storage zone is limited by A^s and α , where the exchange coefficient (α) is related with the rate at which this process occurs and the ratio A^s/A controls the concentration that is interchanged between these two entities. The effects of A^s and α are especially significant when sharp gradients in the rate of concentration are observed, such as during the rising and falling curve. With the available information is not possible to separate between dead and hyporheic zone, however the ratio $A^s/A = 0.54$ suggest that transient storage is very important in this case. Field observations suggest that most of the water at any cross section was in motion, which indicates that both component, hyporheic and dead zones, exist.

Although this model has the ability to include the main components of the solute transport, many of the local processes are not captured. Assuming the transport of solutes as a one-dimensional phenomenon does not allow to fully understand the effect of more complex flow structures such as local variations of velocity and turbulence intensities, and neither their effect in habitat suitability. The advection-dispersion equation is solved using the main channel cross-sectional area (A) and the volumetric flow rate (Q), which in cases of complex or variable geometries can induce over or under estimation of some parameter. A module that accounts for sur-

face roughness and reach slope to compute the hydraulics would add a greater degree of accuracy, maintaining the one-dimensional assumption and its efficiency. However, it has been proved that the model is able to accurately represent the mixing process in large scales with a relatively short execution time and enough flexibility to be used in very different flow and channel conditions.

6. Conclusion

Solute transport in a reach of the Bear Valley Creek was studied using the OTIS model and the extension for parameter estimation OTIS-P. Results showed that this simple model is able to reproduce with a high degree of accuracy the solute transport in a rivers that features large floodplains and bends. This model is powerful tool which can be used for better management of water and aquatic resources. Model's results show that including storage areas allow to have a better representation of the mechanics of the solute transport. The ratio cross-sectional area of the storage zone to the main channel cross-sectional area was in the order of 0.5, indicating the importance of transient storage zones. Although is not possible to split between the effects dead and hyporheic zones with the data presented here, field observation of the flow indicates that both component, hyporheic and dead zones, exist.

7. References

- [1] De Smedt F. 2007. Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hyporheic zone. *Journal of Hydrology*. 339: 29-38.
- [2] Winter TC, Harvey JW, Franke OL, Alley WM. 1998. Ground Water and Surface Water— A Single Resource, USGS Circular 1139, USGS: <http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1139>.
- [3] Bencala KE. 1984. Interactions of solutes and streambed sediment, 2. A dynamic analysis of coupled hydrologic and chemical processes that determine solute transport. *Water Resour. Res.*, 19(3): 718–724
- [4] Tonina D, Buffington JM. 2009. Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects. *Geogr. Compass*. 3(3): 1063–1086.
- [5] Bencala KE. 2000. Hyporheic zone hydrological processes. *Hydrological Processes*. 14: 2797–2798.



- [6] Vaux WG. 1962. Interchange of stream and intragravel water in a salmon spawning riffle. Washington, DC: US Fish and Wildlife Service Special Scientific Report, Fisheries 405.
- [7] Brunke M, Gonser T. 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*. 37: 1–33.
- [8] Jones, JB, Mulhollan, PJ. 2000. Streams and ground waters. San Diego, CA: Academic Press.
- [9] Runkel RL, McKnight DM, Rajaram H (2003) Modeling hyporheic zone processes. *Adv. Water Res.* 26(9): 901-905.
- [10] Runkel RL, Chapra SC. 1993. An efficient numerical solution of the transient storage equations for solute transport in small streams. *Water Resources Res.* 29(1): 211-215.
- [11] Bencala KE. 2006. Hyporheic Exchange Flows. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. 10: pp113.
- [12] Choi J, Harvey JW, Conklin MH. 2000. Characterizing multiple timescales of stream and storage zone interaction that affect solute fate and transport in streams. *Water Resour. Res.* 36(6): 1511–1518.
- [13] Lees MJ, Camacho LA, Chapra SC. 2000. On the relationship of transient storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams. *Water Resour. Res.* 36(1): 213–224.
- [14] Fernald AG, Wigington Jr PJ, Landers DH. 2001. Transient storage and hyporheic flow along the Willamette River, Oregon: field measurements and model estimates. *Water Resour. Res.* 37(6): 1681–1694.
- [15] Laenen A, Bencala KE. 2001. Transient storage assessments of dye – Tracer injections in rivers of the Willamette Basin, Oregon. *J. Am. Water Res. Assoc.* 37(2): 367–377.
- [16] Keefe SH, Barber LB, Runkel RL, Ryan JN, McKnight DM, Wass RD. 2004. Conservative and reactive solute transport in constructed wetlands. *Water Resour. Res.* 40, W01201.
- [17] De Smedt, F, Brevis, W, Debels, P. 2005. Analytical solution for solute transport in streams with transient storage in dead zones. *Water Resour. Res.* 31(1): 25-39.
- [18] Richards C, Kermit LB. 1994. The Great Basin Naturalist. 54(2): 106-113.
- [19] Konopacky RC, Cernera PJ, Bowles EC. 1986. Salmon Ricer habitat enhancement, Bonneville Power Administration. DOE/BP-14383-2. Portland, Oregon.
- [20] Runkel R. 1998. One dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers. US Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 98-4018.
- [21] Runkel R. 2002. A new metric for determining the importance of transient storage. *Journal of the North American Benthological Society*. 21 (4): 529-543.



La problemática de los sistemas de suministro de agua intermitentes. Aspectos generales. The issues of intermittent water supply. A general overview.

Amilkar Ernesto Ilaya-Ayza¹, Enrique Campbell², Rafael Pérez-García³, Joaquín Izquierdo⁴

**1,2,3,4FluIng-IMM Universidad Politécnica de Valencia. Camino de la Vera s/n Edif. 5C, 46022
Valencia, España.**

**amilay@doctor.upv.es, encamgo1@posgrado.upv.es, rperez@upv.es, jizquier@upv.es, phone: 34-
963877007**

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
11-09-2014
Aceptado
03-09-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Abastecimiento
de agua
Suministro
intermitente
Escasez de agua

Article history:

Received
11-09-2014
Accepted
03-09-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Water supply
Intermittent water
supply water
scarcity

Resumen

La escasez del agua no solamente tiene un sentido físico, también se puede hablar de escasez económica del agua y de escasez debida a una mala gestión de los sistemas de suministro, este tipo de escenarios dan lugar a los sistemas de suministro intermitentes, aquellos en los cuales se tienen periodos de suministro menores a las 24 horas. En el presente artículo se analiza la problemática de este tipo de sistemas, desde los inconvenientes y ventajas que puede tener esta forma de suministro, las medidas de solución que deberían tomarse en función de las características del sistema y el tratamiento hidráulico que se debe dar a las redes que trabajan de forma intermitente.

Abstract

Water scarcity should not only be taken into account in its physical sense, but it should also be considered in the economic and poor management sense. This scenario provokes the application of intermittent water supply systems with less than 24 hours of service. In this paper we study the problems of the use of this kind of systems, analyzing the disadvantages and advantages of this form of supply. Possible solutions are proposed in base of the characteristics of the system, and the hydraulic approach that should be taken for intermittent working networks.

1. Introducción.

El acceso al agua es limitado para millones de mujeres y hombres pobres alrededor del mundo, debido a que las razones van más allá de los recursos físicos. En algunos lugares el agua es abundante, pero debido a la falta de infraestructura, producto de los problemas políticos y socio-culturales, se dificulta el acceso para la gente. En otros lugares la demanda de agua de la población es mayor a la disponible como recurso natural.

De esta forma, se define la escasez de agua, en términos de acceso al agua. Más de 1200 millones de personas alrededor del mundo (quinta parte de la población mundial) vive en zonas con escasez física de agua, insuficiente para cubrir sus demandas. Alrededor de 1600 millones de personas viven en cuencas con escasez económica de agua, donde la capacidad de recursos humanos o financieros son insuficientes para desarrollar los recursos hídricos de la región. El crecimiento de la población es un factor importante en la demanda, sin embargo no es el único, puede entonces hablarse de una escasez física y una escasez económica para acceder al agua [1].

Uno de los problemas de las ciudades en países en vías de desarrollo es el incremento de la población urbana, generada por la migración de habitantes del área rural, incrementando la demanda de servicios básicos como el agua potable. Esta situación incide en la cantidad de agua disponible para el abastecimiento. En otros casos, la capacidad del sistema no abastece o la cantidad de agua en la fuente de suministro es insuficiente. Estas limitaciones se ven afectadas aún más con tarifas bajas, las cuales agravan los problemas; de esta forma las empresas de agua potable muchas veces se ven en la necesidad de reducir las horas de suministro, dando pie de esta forma a un sistema con suministro intermitente.

En el informe Benchmarking Internacional de redes de agua y saneamiento del Banco Mundial, se recogen datos sobre los servicios de agua potable, el cual indica que en los países en vías de desarrollo solamente el 16% de las empresas operadoras del suministro de agua cumplieron con el abastecimiento de 24 horas y en promedio se tiene un servicio por 16 horas al día [2].

En el presente artículo se analiza la problemática del suministro intermitente, sus inconvenientes y ventajas, las medidas de solución que deberían tomarse en función de las características del sistema y el tipo de criterios hidráulicos que se deben adoptar para la modelización de estos sistemas.

2. Sistemas de suministro de agua intermitente.

Se considera suministro de agua intermitente cuando el abastecimiento del servicio se realiza por una cantidad limitada de tiempo, la periodicidad con que se abastece es diaria, aunque en los casos extremos alcanza a más de un día. Paradójicamente, este tipo de suministro requiere mucha más agua que los sistemas continuos, veinticuatro horas los siete días de la semana, debido a los niveles altos de desperdicio [3].

Generalmente, este tipo de sistemas están diseñados y construidos para trabajar como sistemas continuos. Sin embargo, son varias las causas para que el suministro se realice de forma intermitente y que, en varias horas del día, la tubería se encuentre vacía con presencia de aire. En muchas ciudades pequeñas con sistema intermitente el servicio es por horas para toda la red simultáneamente. En ciudades más grandes el abastecimiento es con rotación de horas de servicio diferenciados por sectores.

Existen muchas razones por las que existen los sistemas de abastecimiento intermitente. Muchos autores sugieren tres tipos de problemas que pueden provocar o perpetuar el suministro intermitente de agua: la mala gestión técnica, la escasez económica y la escasez absoluta del recurso hídrico [4]. En todos estos casos las empresas encargadas del suministro de agua pueden recurrir como respuesta a corto plazo al abastecimiento de forma intermitente.

Los suministros intermitentes, generalmente buscan reducir la demanda per cápita de agua, bajo una idea de ahorro en costes de inversión y costes operativos. Sin embargo, en lugar de ser una estrategia inteligente, trae consigo consecuencias negativas que prevalecen sobre los factores positivos [4]. Los síntomas de carencia del sistema son niveles de presión en la red muy bajos e insuficiencia en el suministro en los puntos más alejados y/o elevados.

El suministro continuo es la visión a largo plazo para los sistemas de abastecimiento intermitentes. Sin embargo, el suministro por horas es la forma de acceso actual para millones de personas en el mundo, el cual ha existido desde hace décadas y seguirá existiendo, algunos investigadores sugieren que la creciente escasez de agua debido al cambio climático y el aumento de la demanda por el incremento de la población puede llevar a que el uso de suministro intermitente sea más frecuente [5]. Aunque el suministro intermitente es quizás la última medida a tomar en condiciones de escasez de agua, es una situación que debe ser evitada mediante una planificación proactiva y con respuestas oportunas a las condiciones críticas [6].

Una forma de minimizar las dificultades derivadas de los sistemas de abastecimiento intermitente es potenciar un sistema de gestión técnica; que no es más que la administración de un conjunto de procedimientos orientados a mejorar e incrementar, progresivamente y de forma integral, la calidad del servicio [7].

El suministro de agua de forma intermitente es un tipo de servicio muy común en los países en vías de desarrollo. Sin embargo, existen antecedentes, aunque pocos, en países europeos como es el caso de la segunda ciudad más grande de Chipre, Limasol[6], a causa de un periodo extenso de sequía. Asimismo, en Sevilla (España), debido al periodo bastante seco de 1975-1976, precedido por escasas precipitaciones en los dos años anteriores, se tuvo un abastecimiento con restricciones durante noviembre de 1975 a diciembre de 1976 [8].

Un elemento característico de los sistemas de suministro intermitente son los depósitos domiciliarios, enterrados o elevados, indispensables para el almacenamiento de agua en las horas sin suministro. Las conexiones domiciliarias en estos sistemas generalmente constan de la acometida en sí o ramal externo, el ramal de alimentación domiciliario, almacenamiento y la red de distribución interna hacia los puntos de consumo o de utilización [9].

Cuando existe la suficiente presión y caudal para alimentar a los depósitos de almacenamiento elevados se utiliza la conexión indirecta sin bombeo (Figura 1).

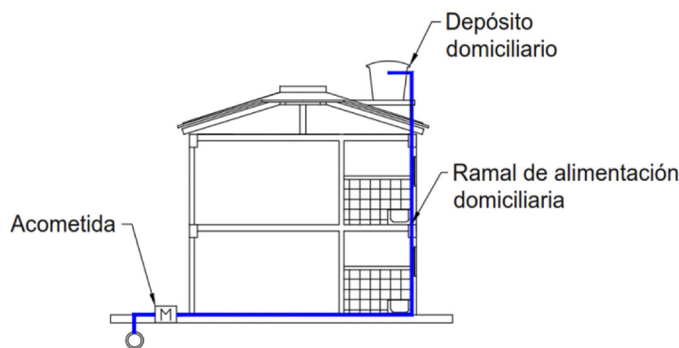


Figura 1. Sistema de conexión indirecta, sin bombeo

Las conexiones indirectas con bombeo (Figura 2) son utilizadas generalmente en edificios multifamiliares, debido al costo que implica el uso de energía eléctrica para la impulsión del agua.

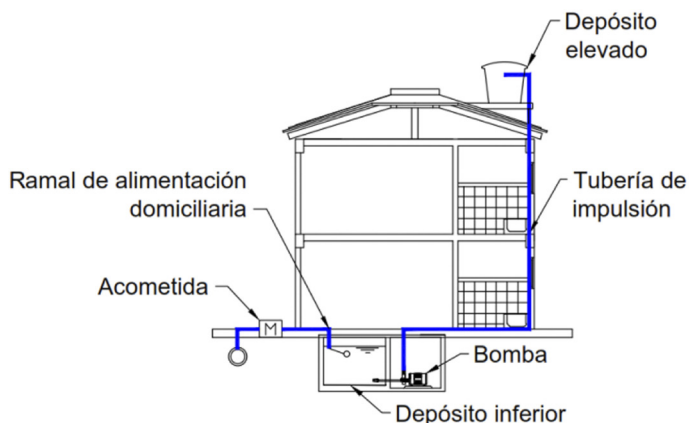


Figura 2. Sistema de conexión indirecto, con bombeo.

2.1. Inconvenientes de los sistemas de suministro intermitente.

El abastecimiento de agua intermitente genera problemas tanto a la empresa encargada del suministro de agua como a los hogares, bajo esta clasificación se tienen los siguientes inconvenientes:

A la empresa de agua:

Se dificultan las tareas de operación, mantenimiento y se incrementa el personal que opera el sistema; las válvulas son operadas con frecuencia por lo que requiere mayor mano de obra, más que en el caso de suministro continuo; según el análisis de 45 empresas de servicios públicos en el Perú, el número de empleados por cada mil conexiones de agua se incrementa en proporción inversa a las horas de servicio [10].

Las fallas de la infraestructura son más frecuentes que en un sistema continuo, debido a la operación del sistema [6], una de las principales fallencias se produce en las válvulas, que sufren un desgaste más rápido [11].

No importa lo bien que se opere la red de distribución del suministro intermitente, sin duda existirán efectos perjudiciales en su integridad [6].

Se dificulta la localización de fugas en el sistema, se genera una mayor cantidad de fugas de fondo.

Es ineficiente desde el punto de vista energético, la demanda de los consumidores llega a tanques o depósitos sometidos a presión atmosférica por lo que el sistema de la vivienda trabajará con menor presión. Muchas veces los tanques domiciliarios no cuentan con válvulas flotador, lo que puede incrementar el desperdicio en las viviendas [12]

El volumen de almacenamiento en los depósitos principales del sistema es insuficiente, el sistema intermitente exige cantidades grandes de almacenamiento [11].

Debido a las horas de suministro limitadas, el factor de pico se incrementa a valores de 4 a 6 en la mayoría de los sistemas [11]; esta situación exige grandes diámetros en la red para satisfacer los requisitos hidráulicos y de demanda, los sistemas intermitentes pueden producir presiones insuficientes, incluso llegar a valores de cero.

Los usuarios pueden estar descontentos con el servicio, lo cual dificultaría las tareas de cobro.

Debido a que en algunos periodos la tubería se encuentra vacía o con presiones bajas, puede ocurrir contaminación por el ingreso de agua del nivel freático o aguas residuales por fisuras o uniones en las tuberías [11] [4].

La presencia de aire en las tuberías puede causar inexactitud en las lecturas de los contadores o medidores domiciliarios, debido a que al inicio del suministro primero empieza a salir aire de la red, midiéndose este volumen adicional para el usuario, aunque cuando se tienen condiciones de vacío en la tubería puede darse el caso contrario si no se tienen válvulas de retención; asimismo, bajo condiciones secas y húmedas repetidas, el deterioro del rendimiento del contador se acelera. Esta situación trae consigo dificultades en el control del consumo y en el cobro de tarifas, puede generar también escepticismo entre los consumidores sobre la exactitud de sus facturas de agua [13].

Debido a que las tuberías están expuestas alternadamente al aire y agua, se corroen más rápidamente, de esta forma tienen que ser reparadas y cambiadas con mayor frecuencia que en los sistemas continuos [3].

La presencia de aire atrapado entre dos columnas de agua sometidas a presión, puede provocar importantes sobrepresiones [14], situación común en sistemas intermitentes cuando comienza el horario de suministro, lo que puede causar daño a la tubería, juntas y accesorios, generando posteriormente fugas o el ingreso de contaminación a la red, como se comentó anteriormente.

Existe el riesgo de contaminación en los depósitos domiciliarios; según un análisis de la calidad del agua en depósitos domiciliarios de Estambul (Turquía), el 24% de las muestras resultaron tener presencia de coliformes [10].

La incertidumbre del suministro entre los consumidores hace que almacenen agua en los periodos de servicio [11], en algunos casos, mayor cantidad de agua que la requerida, también es muy probable que los consumidores mantengan sus grifos abiertos [13], incrementando las cantidades de demanda y generando desperdicio.

Requieren más inversión en infraestructura que los sistemas continuos, muchos de los componentes del sistema son infrautilizados y otros son sobreexplotados hasta dañarlos [3].

El agua que queda en las tuberías después de la distribución, se encuentra mayor tiempo en la tubería, por lo que el efecto residual del cloro puede reducirse.

Se incrementa el número de acometidas clandestinas debido a que estas se realizan con mayor facilidad en periodos en los cuales no hay agua en la red.

Debido a las presiones bajas en los puntos más desfavorables del sistema, se tendrán caudales de consumo mínimos, los cuales pueden no ser medidos de forma correcta por los contadores o medidores, debido al error que tienen para medir caudales bajos [15].

A la población:

Debe almacenar agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de las horas o días en los cuales no se tenga el abastecimiento de agua. Si los hogares no pueden recibir esta cantidad recurrirán a otras fuentes de agua como pozos, los cuales pueden estar contaminados en las grandes ciudades, o a pagar mucho más a camiones cisterna que venden el agua, al costo adicional que deben cubrir estas familias para un acceso al agua se denomina costo de afrontamiento, frecuentemente este monto es mayor a la cantidad que se paga por una tarifa en un suministro continuo. Los pobres, por su parte, pagan mucho más por el agua debido a que deben recurrir a métodos para asegurar la salubridad del agua que consumen, por ejemplo hervir el agua. Un estudio realizado en Tegucigalpa (Honduras) [10], estima que los costos de las familias más pobres que deben hacer frente al tipo de suministro intermitente alcanza a 180 % de la tarifa del agua.

La mayoría de los consumidores cuentan con tanques de almacenamiento en su propia vivienda, sin embargo esto se dificulta en las zonas de bajos ingresos, debido a que no cuentan con el dinero ni a veces el espacio para instalar un depósito domiciliario, por lo que se recurre al almacenamiento en pequeños recipientes; también es común que en las horas de suministro estas personas realicen actividades adicionales en las cuales se requiere agua, como el aseo y otros, aprovechando de esta forma las horas de servicio consumiendo mayor caudal.

Debido a que el agua llega a depósitos domiciliarios, en varios casos es necesario elevar el agua a niveles superiores, donde la presión de la red en suministro continuo sería suficiente, esto implica costos de adquisición de equipos de bombeo y pago de energía por parte del consumidor.

Otra dificultad radica en que la gente en las zonas de bajos recursos económicos solamente cuenta con un grifo en la vivienda, lo cual exige que se encuentre en la hora de suministro con los recipientes necesarios. Los sistemas de distribución intermitentes resultan una inequitativa forma de distribución de caudal y presión en los sistemas de abastecimiento [4].

Causa trastornos y agitación de las actividades diarias de las personas, en casa o en el trabajo [6], debido a que el momento en que se dispone de agua no siempre es conveniente para los usuarios; por otra parte, varios consumidores, de las zonas más pobres, tendrán que ir a piletas públicas, las largas distancias y las colas son un problema típico que sufren mujeres y los niños perdiendo de esta forma un tiempo productivo [4].

Insalubridad, debido a los problemas de contaminación que pueden causarse en los depósitos de almacenamiento domiciliario. Los sistemas de abastecimiento intermitente no cubren los riesgos

de incendio durante los períodos sin suministro, este tipo de inconvenientes durante estos períodos puede ocasionar desastres y un gran daño a la propiedad, inclusive a la vida [10].

Durante los primeros minutos de suministro, se produce el lavado inicial de la red, en este periodo la calidad del agua es baja [16], estos niveles peligrosos de contaminación persisten hasta por 20 minutos de re-presurización [17]. Las pocas horas de suministro producen caudales punta, que generan a su vez velocidades excesivas, las cuales pueden producir el desprendimiento de biopelículas que incrementarán el riesgo en la salud de los usuarios [18].

2.2. Ventajas de los sistemas de suministro intermitente

Entre las ventajas que ofrece un sistema intermitente:

Puede dar lugar al ahorro de agua, relacionado con las pérdidas (fugas y errores en la medición principalmente), debido a que las mismas ocurren durante menos tiempo por las restricciones en el suministro de agua, por estas razones se adopta este tipo de servicios en los lugares donde hay escasez de agua en la fuente de abastecimiento [6][10], aunque el sistema está sometido a un estado de intermitencia que tenderá a generar mayor cantidad de pérdidas de agua en el periodo con suministro.

Con una planificación adecuada, las tareas de mantenimiento pueden realizarse en horas en las cuales no hay agua en la red [19], aunque en el caso de reparación de fugas, la identificación de los puntos donde se producen se dificulta cuando no existe agua en la red.

Generalmente son sistemas con redes sectorizadas, debido a que necesitan dar el servicio por horas, esta situación puede ser aprovechada para establecer los Distritos Hidrométricos (DMA) para el monitoreo y control de las pérdidas.

3. Categorización de los sistemas intermitentes.

Uno de los primeros pasos para dar respuesta o solución tanto a la gestión como a la construcción de infraestructura de ampliación en un sistema de suministro de agua intermitente es la categorización, de esta forma se podrán elegir las medidas pertinentes para la mejora de este tipo de sistemas.

En este sentido, Totsuka et al. [4] proponen una categorización basada en una matriz que relaciona el tipo de escasez del sistema intermitente y el tipo de problemas que tiene el mismo, ver Tabla 1.

Escasez de agua	Tipo 1: Escasez debida a una mala gestión	Tipo 2: La escasez económica	Tipo 3: La escasez absoluta
Problemas Tipo A: Uso de sistemas de 24 horas	Categoría 1A	Categoría 2A	Categoría 3A
Problemas Tipo B: Problemas de sistemas genuinamente intermitentes	Categoría 1B	Categoría 2B	Categoría 3B

Fuente: [4]

Tabla 1. Categorización de los sistemas de abastecimiento intermitente

Los sistemas intermitentes que tienen escasez debida a una mala gestión, son aquellos que tienen capacidad en el sistema de distribución o infraestructura necesaria (tuberías principales, depósitos de almacenamiento y otros) y la cantidad de agua disponible extraída de las fuentes de abastecimiento es suficiente para cubrir el nivel actual de demanda. Por lo que la causa principal porque el suministro se vuelve intermitente es la mala gestión del sistema de abastecimiento (fugas, desperdicio, operación y mantenimiento deficiente, etc.). También se incluye a aquellos sistemas en los cuales el suministro de electricidad es pobre y no depende del control del operador del servicio público de agua, lo cual puede generar intermitencia.

Los sistemas de escasez económica son aquellos que tienen suministro intermitente debido a que las demandas y el número de conexiones exceden la capacidad hidráulica del sistema de distribución. En esta última etapa, la demanda también supera la capacidad de la fuente de abastecimiento (pozos, tomas de río, embalses, etc.); el agua se vuelve escasa porque la capacidad financiera del operador no es lo suficientemente fuerte como para ampliar la infraestructura existente. Puede llegarse a esta situación como resultado de la poca planificación de la demanda de agua, aunque el sistema requerirá necesariamente la construcción de infraestructura de ampliación.

El caso más crítico es el de escasez absoluta, causada por volúmenes insuficientes en la fuente. Este puede ser el problema más complicado de resolver, a veces las fuentes alternativas pueden estar situadas a grandes distancias o pueden requerir gran consumo de energía. En este caso debe recurrirse al racionamiento y conservación del agua, tanto la empresa de agua y los consumidores deben compartir la responsabilidad.

Los problemas tipo A están relacionados con sistemas que fueron diseñados y construidos para trabajar continuamente, sin embargo son operados como intermitentes como por ejemplo: presiones bajas en los extremos de la red, molestias a los usuarios, presencia de aire en el medidor o contador, etc.

Los problemas Tipo B surgen debido a un suministro propiamente intermitente, por ejemplo: la contaminación del agua por los motivos ya expuestos, costes de afrontamiento y desperdicio de agua.

4. Características hidráulicas de un sistema intermitente.

El diseño de sistemas de distribución de agua, generalmente parte del supuesto de suministro continuo, sin embargo cuando se tiene un suministro intermitente las condiciones hidráulicas de funcionamiento cambian, esta situación genera pérdidas de presión y gran desigualdad en la distribución del agua [20].

Existe abundante literatura para la planificación, diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de suministro continuos, mientras que el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento intermitentes se basa principalmente en la experiencia y el análisis de la oferta y la demanda de agua [3].

Cuando se tienen infraestructuras diseñadas para suministro continuo y se las usa para suministro intermitente, esto se traduce en el transporte de mayores caudales que los esperados por las tuberías, en consecuencia se producen grandes pérdidas de carga en la red, los consumidores más alejados de los puntos de suministro son los más afectados, debido a que no pueden abastecerse con una cantidad suficiente de agua durante las primeras horas de suministro, cuando todos están consumiendo agua.

4.1. Demanda dependiente de la presión

Convencionalmente, se ha optado por el análisis DDA (Demand-Driven Analysis) para resolver problemas hidráulicos de redes (suministro continuo). Esta técnica supone que la cantidad de agua requerida a lo largo de las tuberías se conoce y estas pueden ser agrupadas en un punto de demanda (nodos de la red), por lo tanto, se obtiene el comportamiento del sistema calculando presiones y caudales, la resolución de las ecuaciones se basa en valores fijos de demanda en los nodos. En este tipo de análisis, cualquier relación entre la demanda y la presión es ignorada y las demandas son siempre satisfechas aun cuando las presiones en los nodos del modelo puedan estar por debajo de cero, esto implica que los consumidores pueden tener un suministro normal con presiones bajas e incluso negativas. Obviamente, esta hipótesis no es realista y representa la principal deficiencia de los enfoques del DDA [21]. En muchos casos la presión nodal no es suficiente para suminis-

trar la demanda deseada, en estas situaciones la demanda pasa a depender de la presión, a este enfoque se lo conoce como PDD (Pressure Dependent Demand).

En un sistema de suministro intermitente, con depósitos domiciliarios en la red, considerando que el nudo de suministro tendrá variaciones de presión entre un valor mínimo, que genera el comienzo del suministro, hasta un valor máximo de presión definido por las condiciones del sistema, se obtienen las relaciones mostradas en la Figura 3.

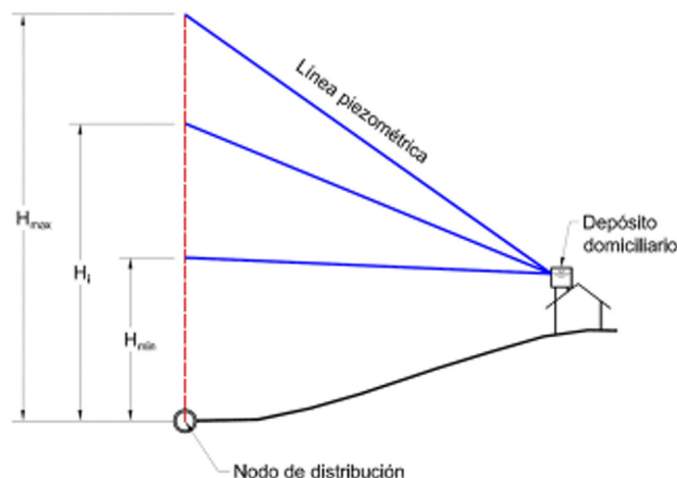


Figura 3. Esquema simplificado de la variación de la presión y su relación con el caudal suministrado

Donde:

H_{min} = Presión mínima en el nudo de suministro, a partir de esta presión comienza el suministro.

H_{max} = Presión máxima en el nudo de suministro

Q_i = Caudal de suministro o demanda del grupo de viviendas.

Q_{max} = Caudal máximo disponible para suministro.

De forma general, la pérdida de carga está definida por la relación:

$$h_f = K \cdot Q^n \quad (4.1)$$

Donde:

K = Factor que depende del tipo de material, tipo de fluido, longitud y diámetro del conducto.

n = Exponente relacionado con la ecuación de pérdidas de carga utilizada (Darcy-Weisbach = 2, Hazen-Williams = 1.852, etc.)

Del gráfico se observa que:

$$H_{max} = H_{min} + h_{fmax} \quad (4.2)$$

$$H_i = H_{min} + h_{fi} \quad (4.3)$$

Entonces se tendrá:

$$h_{fmax} = H_{max} - H_{min} \quad (4.4)$$

$$h_{fi} = H_i - H_{min} \quad (4.5)$$

Haciendo la pérdida de carga función del caudal, se tiene:

$$K \cdot Q_{\max}^n = H_{\max} - H_{\min} \quad (4.6)$$

$$K \cdot Q_i^n = H_i - H_{\min} \quad (4.7)$$

Considerando que las condiciones de la conducción de suministro se mantienen, dividiendo ambos términos se tiene una relación entre el caudal demandado y las presiones[22]:

$$Q_i = Q_{\max} \cdot \left(\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{1/n} \quad (4.8)$$

Esta es una primera aproximación de la relación entre el caudal demandado y la presión para un sistema de suministro con depósitos domiciliarios (Figura 4).

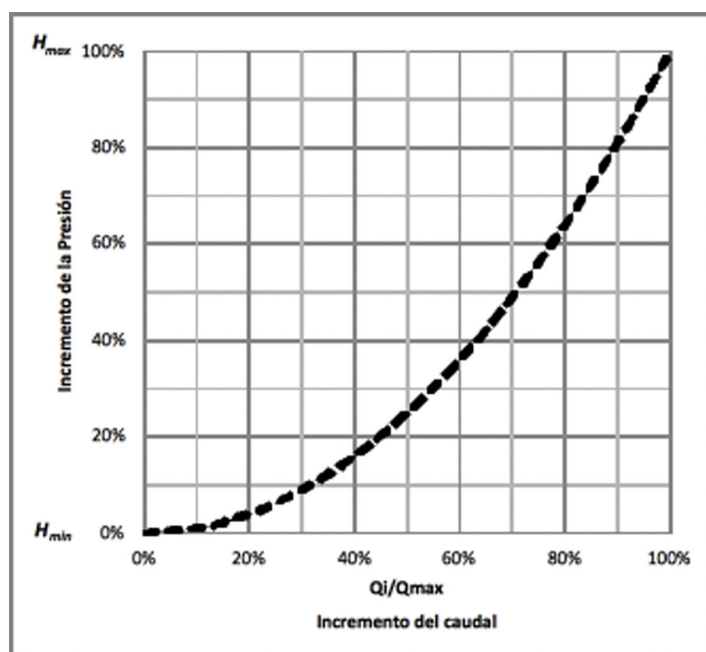


Figura 4. Incremento del caudal ofertado o suministrado con relación a la presión de servicio, $n=2$

De forma general, otros autores definen una relación PDD establecida por una función exponencial y un tramo lineal [23], las relaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned} 0 & H_i \leq 0 \\ \frac{Q_i}{Q_n} &= \left(\frac{H_i}{H_n} \right)^\alpha & 0 < H_i < H_t \\ \left(\frac{H_i}{H_n} \right)^\alpha & & H_i \geq H_t \end{aligned} \quad (4.9)$$

Donde:

H_i = Presión calculada en el nodo

Q_{ri} = Demanda de referencia o demanda solicitada en el nodo

Q_{is} = Demanda calculada en el nodo

H_{ri} = Presión de referencia que se considere para abastecer la demanda total solicitada o de referencia

H_t = Límite de presión, por encima de este valor la demanda es independiente de la presión del nodo

α = Exponente de la relación de demanda/presión

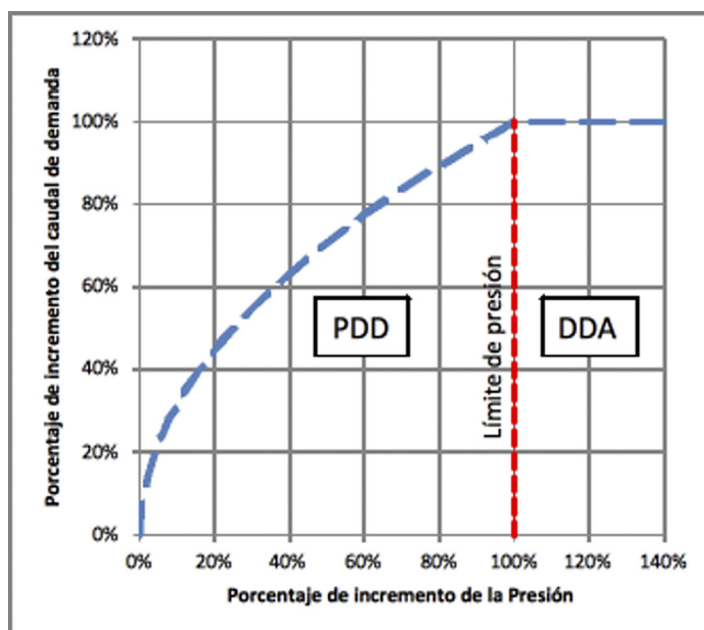


Figura 5. Curva típica de la Demanda Dependiente de la Presión (PDD), adaptado de [23]

A diferencia del modelo de distribución de agua convencional, donde la demanda en el nodo es un valor conocido, en el enfoque de modelado de la demanda dependiente de la presión (PDD), se establece que tanto la demanda como la presión en el nudo son valores desconocidos.

En los sistemas de suministro intermitente, el efecto de los tanques de almacenamiento domiciliarios y las pocas horas de servicio, dificultan superar el límite de presión que independiza a la demanda de la presión, por lo que el análisis de este tipo de sistemas, en las horas en las cuales existe suministro, debe realizarse considerando el criterio PDD. De esta forma pueden ser analizadas las horas con suministro.

La modelización de sistemas con suministro intermitente es una tarea difícil, debe considerarse que la red no está presurizada por completo en los primeros minutos de suministro, en consecuencia las presiones son muy bajas; las horas limitadas de suministro por día y los puntos de consumo conectados a tanques de almacenamiento domiciliarios generan el vaciado y llenado frecuente de las tuberías, complicando la modelación dinámica con software convencional [22].

Un modelo dinámico del sistema con suministro intermitente necesita simular el proceso de carga en las tuberías, se requiere la integración de la ecuación de momento y la ecuación de velocidad para conocer las posiciones de la primera línea de agua en la red en cualquier momento [24] [25].

5. Conclusiones.

A pesar de la enorme cantidad de inconvenientes de los sistemas de suministro intermitente, mundialmente existen varios sistemas de suministro de agua que trabajan de esta forma, sin embargo, no son gestionados ni estudiados como debería ser.

La amenaza de factores como el cambio climático o el crecimiento de la población ponen en riesgo la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro, situación que dificultaría la transición de los sistemas intermitentes existentes a suministros continuos y generarían condiciones para nuevos sistemas intermitentes donde actualmente el suministro es continuo.

La categorización del sistema intermitente permite establecer las medidas necesarias de solución para el sistema intermitente; cuando la escasez se debe a una mala gestión, se requerirá de medidas relacionadas con gestión técnica, acompañada de poca infraestructura, sin embargo cuando la escasez es económica es necesario plantear infraestructura adicional para ampliar la capacidad del sistema.

El cálculo hidráulico en los periodos con suministro debe realizarse con el criterio PDD, de esta forma se tendrán valores de caudal y presión más cercanos a la realidad, cuando se utiliza el criterio DDA las presiones calculadas en el modelo pueden llegar a ser incluso negativas.

6. Bibliografía.

- [1] International Water Management Institute. 2007. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London: International Water Management Institute.
- [2] Van den Berg C, Danilenko A. 2011. The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book. Washington D.C.: TheWorld Bank.
- [3] Faure F, Pandit M. 2010. Intermittent Water Distribution. Available: <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-distribution/hardware/water-distribution-networks/intermittent-w>. Accessed 20/06/2013.
- [4] Totsuka N, Trifunovic N, Vairavamoorthy K. 2004. Intermittent urban water supply under water starving situations. In 30th WEDC International Conference, Vientiane, Lao.
- [5] Tsegaye S, Eckart J, Vairavamoorthy K. 2011. Urban water management in cities of the future: emerging areas in developing countries. *Onthewaterfront*, p. 42-48.
- [6] Charalambous B. 2012. The Effects of Intermittent Supply on Water Distribution Networks. In *WaterLoss 2012*, Manila, Philippines.
- [7] Vela A, Días J, Aguirre A. 1996. Gestión técnica de Sistemas de Abastecimiento.
- [8] [EMASESA] Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S. A. 2005. Así éramos, así somos. 1975-2005. Available: http://www.aguasdesevilla.com/fileadmin/uploads/tx_user_embed_pdf/ASI_ERAMOS_ASI_SOMOS.pdf. Accessed 20/06/2013.
- [9] Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. 2011. Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias Domiciliarias, La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua- Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- [10] Yepes G, Ringskog K, Sarkar S. 2001. The High Cost of Intermittent Water Supplies. *Journal of Indian Water Works Association*, p. 33.
- [11] Dahasahasra SV. 2007. A model for transforming an intermittent into a 24x7 water supply system. *Geospatialtoday*, p. 34-39.
- [12] Cabrera-Bejar JA, Palma J, Cerón B, De Jesús M. 2009. Suministro intermitente de agua potable: caso Chilpancingo. In *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, Acapulco.
- [13] [IWWA] Indian Water Works Association. 2000. International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management: Technical Papers. Proceeding for the International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management, Mumbai, India.
- [14] Fuertes V, Izquierdo J, Iglesias P, Cabrera E, García-Serra J. 1997. Llenado de tuberías con aire atrapado. *Ingeniería del Agua*, Vol. 4, nº 3, p. 53- 63.
- [15] Criminisi A, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G. 2009. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. *WaterScience and Technology*, vol. 60, nº 9, p. 2373-2382.
- [16] Kumpel E, Nelson KL. 2013. Comparing microbial water quality in an intermittent and continuous piped water supply. *WaterResearch*, vol. 47, p. 5176-5188.



[17] Neelakantan T, Rammurthy D, Smith ST, Suribabu C. 2014. Expansion and Upgradation of Intermittent Water Supply System. Asian Journal of Applied Sciences, vol. 7, p. 470-485.

[18] Tokajian S, Hashwa F. 2003. Water quality problems associated with intermittent water supply. Water Sci Technol., vol. 47, nº 3, p. 229-234.

[19] Tavera M. Metodología para la gestión y planificación de un sistema de agua potable intermitente [doctoral thesis]. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

[20] Vairavamoorthy K, Akinpelu E, Lin Z, Ali M. 2001 Design of sustainable water distribution systems in developing countries. In ASCE conference, Orlando, Florida.

[21] Cheung PB, Van Zyl JE, Reis LFR. 2005. Extension of EPANET for Pressure Driven Demand modeling in water distribution system. Computer and Control in Water Industry, Water Management for the 21st Century.

[22] Ingeduld P, Svitak Z, Pradhan A, Tarai A. 2006. Modelling intermittent water supply systems with EPANET. In 8th annual WD symposium, Cincinnati.

[23] Wu ZY, Wang RH, Walski TM, Yung SY, Bowdler D, Baggett CC. 2006. Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis. In 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati, Ohio.

[24] Battermann A, Macke S. 2001. A Strategy to Reduce Technical Water Losses for Intermittent Water Supply Systems, Judayta.

[25] De Marchis M, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G, Napoli E, Notaro V. 2010. A model of the filling process of an intermittent distribution network. Urban Water Journal, vol. 7, nº 6, p. 321-333.

[26] Maurya S, Bind YK, Srivastava V. 2008. Cost Estimation and Comparative study of Intermittent & Continuous Water Supply System of Dulhi Village, Kheri. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, p. 668- 672, 2008.



Matriz árido-ligante: factores implicados en la capacidad adhesiva y cohesiva del ligante asfáltico

Aggregate – asphalt binder matrix: factors involved in the adhesive and cohesive capacities of asphalt binder

Valdés G.¹, Calabi A. ¹, Sanchez E. ¹, Miró R.2, Reyes O.³

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
13-05-2015
Aceptado
03-09-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Cemento Asfáltico
Cohesión
Adhesión

Article history:

Received
13-05-2015
Accepted
03-09-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Asphalt Binder
Cohesion
Adhesion

¹Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile.

²Departamento de Infraestructuras del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

³Departamento de Ingeniería Civil Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.
gonzalo.valdes@ufrontera.cl, teléfono: 56-45-325681

Resumen

En este artículo se presentan, en un lenguaje sencillo y técnico, los factores que afectan a las uniones entre el árido y el ligante de una mezcla asfáltica. En primer lugar, se describen los conceptos de adhesión y cohesión asociados al fallo en las mezclas asfálticas. Se explican las teorías de adhesión y se presentan los factores internos y externos que influyen en el comportamiento de las uniones de estos materiales. Además, se describen los mecanismos de fallo y los principales deterioros asociados al fallo en las uniones árido-ligante de una mezcla asfáltica.

Abstract

This paper presents, in an easy and technical language, the factors which affect the bonds between aggregate and binder in asphalt mixture. First, the concepts of adhesion and cohesion associated with failure in asphalt mixtures are described. Theories of adhesion are explained, and the internal and external factors that influence the behavior of the bonds of these materials are presented. In turn, the mechanisms of failure and main damages related to failure between aggregate-binder bonds in an asphalt mixture are described.

1. Introducción

Las mezclas asfálticas son materiales compuestos por áridos, filler y ligantes asfálticos, mezclados en distintas proporciones. Este material ha sido considerado por mucho tiempo como uno de los materiales más importantes utilizados en las capas superiores de los pavimentos flexibles [1]. Esto se debe principalmente a las propiedades funcionales y estructurales que posee este material, que permite por una parte, obtener un buen nivel de confort y seguridad en la conducción a los usuarios, mientras que por otra, puede resistir las solicitaciones del tráfico y del medioambiente, obteniéndose un buen nivel de durabilidad acorde al periodo de diseño considerado para la estructura de pavimento [2]. En este contexto, se entiende por durabilidad de una mezcla asfáltica la propiedad relacionada con la capacidad del material o de sus materiales constituyentes para resistir los agentes medioambientales, tales como el efecto del agua, el envejecimiento y las variaciones térmicas; simultáneamente a las cargas originadas por el tráfico, sin presentar deterioros significativos en un periodo de tiempo considerado [3]. Aunque existen diferentes tipos de pavimentos flexibles con distintas propiedades que sirven a diversos propósitos (basados principalmente en el nivel de tráfico, clima, características del suelo de fundación, entre otros), todas las mezclas asfálticas utilizadas en estas estructuras deben tratar de maximizar las siguientes cualidades: la resistencia a la deformación, a la fisuración, al daño por humedad y ser durables en el tiempo [4]. Sin embargo, independiente de la eficiencia con las cuales son diseñadas y construidas las mezclas asfálticas, éstas van a estar sometidas al efecto combinado de solicitaciones medioambientales y altas cargas de tráfico que tenderán a producirles un daño acumulado, con un grado de severidad creciente en el tiempo. De acuerdo a lo anterior, el principal objetivo de este artículo es presentar, en un lenguaje sencillo, pero con un rigor técnico de los conceptos, formas de fallo y factores internos y externos que influyen en las uniones árido-ligante cuando las mezclas asfálticas están en servicio en una estructura de pavimento, conjuntamente con los mecanismos de fallo y los deterioros de las mezclas asfálticas.

2. Conceptos de adhesión y cohesión

Para lograr una mejor comprensión de los deterioros producidos en las mezclas asfálticas cuando están sometidas a distintos tipos de solicitaciones en las estructuras del pavimento, es fundamental comprender los conceptos de adhesión y cohesión asociados al material. Adhesión se entiende como la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares y mecanismos de anclaje [5]. Mientras que cohesión se define como la propiedad

que mide la fuerza de atracción entre las partículas o moléculas de un mismo cuerpo o material, concepto que se diferencia de la adhesión, principalmente debido a que ésta última propiedad se produce entre la superficie de distintos cuerpos o materiales [6], tal cual se observa en la Figura 1.

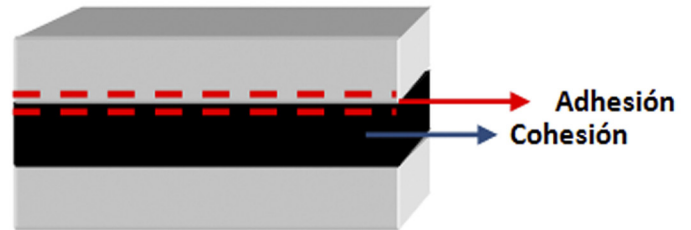


Figura 1: Cohesión y adhesión. Fuente: Adaptada de [4]

Particularmente, en el caso de las mezclas asfálticas, el fallo adhesivo (pérdida de adhesión) se presenta cuando se produce una ruptura de la unión en la interfaz entre el ligante asfáltico (órmástico=ligante + filler) y el árido; mientras que el fallo cohesivo ocurre debido a la ruptura de la unión entre las propias moléculas del ligante asfáltico.

En el contexto de las mezclas asfálticas, la adhesión puede ser utilizada para referirse a la cantidad de energía que se requiere para lograr romper la unión entre el ligante asfáltico y los áridos; mientras que la cohesión puede ser utilizada para referirse a la energía que se requiere para romper las fuerzas intermoleculares que se desarrollan para mantener unidas las moléculas dentro del propio ligante asfáltico [7] [4]. Este fenómeno se puede visualizar en la Figura 2, que muestra cómo interactúan los esfuerzos de adhesión y cohesión entre el ligante asfáltico y los áridos.

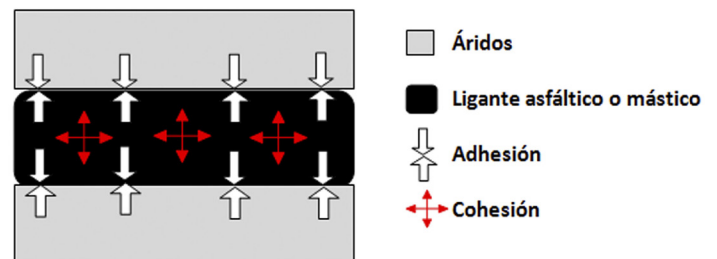


Figura 2: Fuerzas de adhesión y cohesión entre ligante asfáltico y áridos. Fuente: Adaptada de [4]

Para comprender los tipos de fallos adhesivos y cohesivos se requiere definir los conceptos de tensión de rotura teórica (σ_t) y tensión de rotura real (σ_r). La tensión de rotura teórica es aquella fuerza máxima por unidad de superficie que soporta el adhesivo, el ligante asfáltico mástico en el caso de las mezclas. Mientras que la tensión de rotura real es la fuerza máxima por unidad de superficie que soporta la interfaz de ambos materiales, es decir, la unión de superficies entre el árido y el ligante o mástico asfáltico para el caso de las mezclas.

En este contexto, en la Figura 3 se observan los diferentes tipos de fallos que pueden ocurrir entre el ligante o mástico asfáltico y los áridos. El fallo adhesivo se produce en la interfaz entre la superficie del árido y el ligante (zona de adhesión), y se caracteriza porque el ligante se ha separado completamente del árido, pudiendo o no, dejar alguna mancha o descoloramiento en el árido producto de la separación del ligante. Este tipo de fallo se produce cuando la tensión de rotura real (σ_r) es menor a la tensión de rotura teórica (σ_t). Por otra parte, el fallo cohesivo en la unión árido-ligante se produce cuando la rotura se encuentra en el propio ligante asfáltico y se pueden observar restos de ligante en ambas superficies de los áridos. Este tipo de fallo se origina cuando la tensión de rotura teórica (σ_t) es menor que la tensión de rotura real (σ_r). Finalmente, se encuentra el fallo mixto, que es aquel en que se puede observar el efecto combinado de un fallo adhesivo y cohesivo. De acuerdo a diferentes investigadores, el fallo mixto es el que se produce mayoritariamente en las mezclas asfálticas [4] [8], en mayor o menor grado de ponderación de cada fallo (adhesivo o cohesivo), según sea la exposición de las mezclas asfálticas a los diversos agentes solicitantes (tráfico y medioambiente).

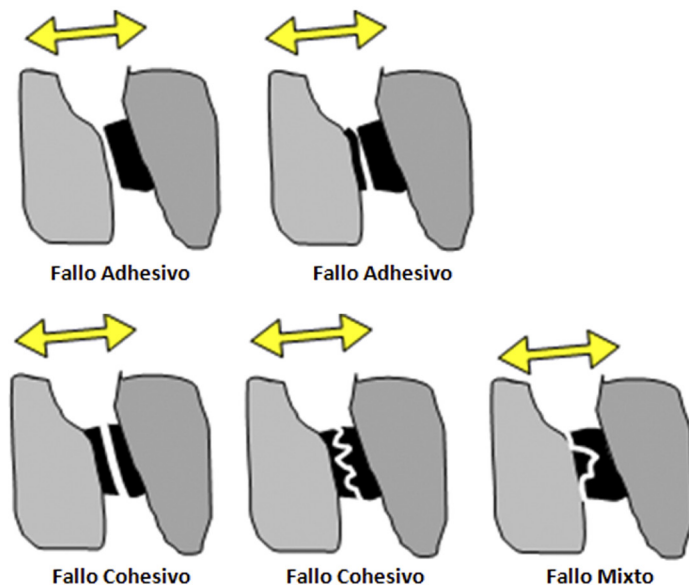


Figura 3: Tipos de fallo en la unión árido-ligante

2.1. Teorías de adhesión en las uniones árido-ligante

La interacción entre el árido y el ligante es un fenómeno complejo. Las teorías que tratan de explicar los fallos a partir del estudio del fenómeno de adhesión entre los áridos y el ligante en una matriz de mezcla asfáltica son varias, y no existe alguna que pueda justificar en plenitud todos los mecanismos de fallo. Es por ello, que dependiendo del caso particular de estudio, toma más importancia una u otra teoría. A continuación, se resumen las teorías más significativas en la interacción adhesiva entre el árido y el ligante.

Teoría mecánica de adhesión

Es una de las primeras teorías desarrolladas y se basa en el anclaje que se produce entre el adhesivo y el sustrato, producto de las rugosidades y porosidades de éste último, es decir, de la topografía superficial del sustrato. En el caso de las uniones árido-ligante, la adhesión está influenciada por las propiedades físicas de los áridos (Figura 4), tales como el tamaño de las partículas, textura superficial, angulosidad, porosidad o absorción y área superficial [9].

Estas características de los áridos van a influir en su topografía superficial, permitiéndole al ligante penetrar y rellenar las irregularidades y poros, produciéndose zonas de anclajes de sujeción entre el ligante y el árido, mejorando la resistencia de rotura real (σ_r). En general, se obtendrá una mejor unión adhesiva entre el árido y el ligante cuanto más rugoso sea éste y posea mayor cantidad de superficie de contacto en la matriz. A parte de la existencia de porosidad y rugosidad en el árido, es necesario que el ligante, en el momento del mezclado, posea la viscosidad adecuada para que pueda cubrir correctamente toda la superficie del árido penetrando en todas las irregularidades y poros de éste, generando así una zona de anclaje y sujeción que mejore la adhesión entre ambos materiales. Esta teoría tiene el inconveniente de no poder explicar los fenómenos de adhesión entre superficies de baja rugosidad o lisas y aquellas producto de incompatibilidades por afinidad química entre el ligante asfáltico y el árido.

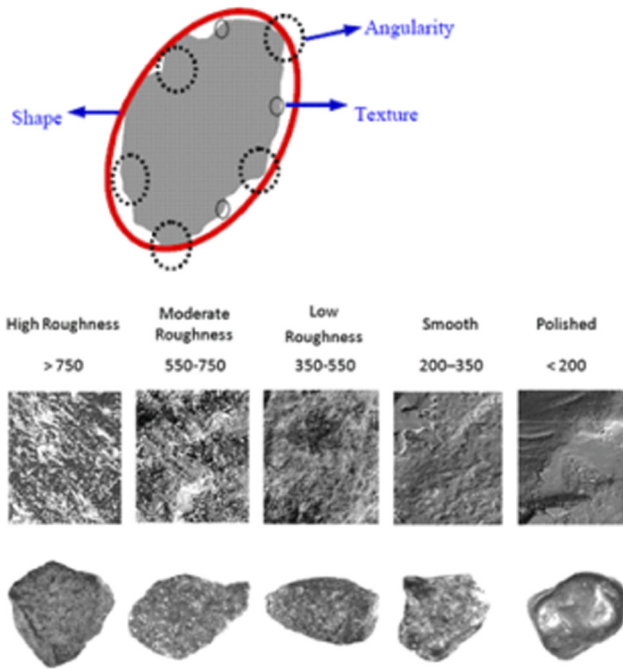


Figura 4: Propiedades físicas de los áridos importantes en la adhesión mecánica con el ligante. Fuente: [10] [11]

Teoría química de adhesión

La teoría química de adhesión resulta cuando dos materiales pueden formar un compuesto al unirse producto de su afinidad, es decir, entre el adhesivo y el sustrato. Una vez que el adhesivo ha mojado correctamente al sustrato, el fenómeno de la adhesión se origina siempre y cuando se generen fuerzas intermoleculares, es decir, enlaces químicos entre ellos. El concepto de reacción química surge de la presencia de componentes reactivos (ácidos y básicos) en la interacción o interfaz entre árido y ligante. Estos componentes son llamados radicales y existen principalmente en forma de dipolos. Este concepto señala que la unión árido-ligante resulta de la reacción de esos componentes entre sí para formar compuestos, los cuales algunas veces se separan en presencia de agua produciendo el fenómeno de stripping [12].

Teoría de la adsorción

El fenómeno de adhesión entre el ligante asfáltico (adhesivo) y el árido (sustrato) se explica también a través de la teoría de adsorción, mediante conceptos como el ángulo de contacto, la humectabilidad (capacidad de mojado de un sustrato) y la tensión superficial. El ángulo de contacto y las energías superficiales del ligante asfáltico y del árido van a definir la capacidad de humectar o mojar del ligante ante un árido determinado. Por ángulo de contacto se entiende la forma que se genera cuando entra en contacto una gota de ligante asfáltico con la superficie del árido,

indicando el grado de humectabilidad existente entre el ligante y el árido, Figura 5.

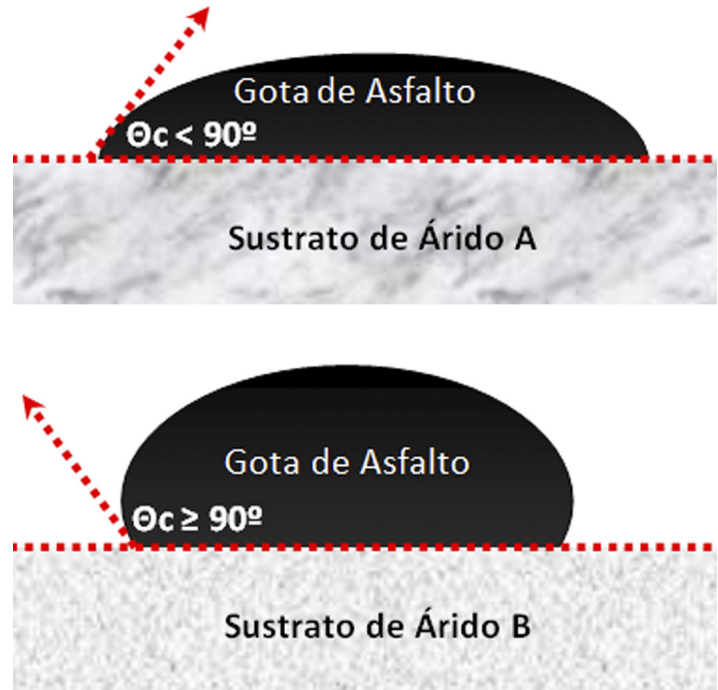


Figura 5: Ángulo de contacto entre el asfalto y agregado.

Para ángulos inferiores a 90°, se entiende que el ligante humecta o moja correctamente al árido, generando una buena adhesión entre ambos materiales, mientras que para ángulos mayores a 90°, no se genera una correcta adhesión. Asociado al concepto de ángulo de contacto, y que definen parte de la teoría de adsorción, se encuentran los conceptos de tensión superficial y energía superficial. La tensión superficial es la resistencia que, en este caso, presenta el ligante asfáltico a deformarse o romperse, mientras que la energía superficial es la propiedad que posee el árido para atraer o repeler de su superficie al ligante asfáltico a través de fuerzas intermoleculares. Para el caso de la interacción árido-ligante, cuando el ligante dispone de una tensión superficial inferior a la energía superficial del árido, este es capaz de humectar la superficie del árido generando un ángulo de contacto inferior a 90°, creando una buena adhesión entre ambos materiales. En otras palabras, cuando el árido posee una alta energía superficial, tiende a atraer al ligante que tiene una baja tensión superficial, debido a su viscosidad a la temperatura de fabricación de la mezcla.

3. Factores internos que influyen en las uniones árido- ligante

De acuerdo a lo presentado en las teorías del apartado anterior, son muchos los factores que pueden determinar el comportamiento de las uniones árido-ligante en una mezcla asfáltica, y muchas veces los efectos analizados no son individuales, sino una mezcla de ellos. En este apartado se presentan aquellos factores internos que tienen relación con los materiales constituyentes de las mezclas asfálticas y su diseño.

3.1. Propiedades de los materiales

La influencia que, en general, tienen los materiales que componen las mezclas asfálticas en el proceso de adhesión entre ambos es compleja. El comportamiento adhesivo de la unión árido-ligante va a depender de sus propiedades físico-químicas [13].

En el caso del árido, sus propiedades físicas estarán definidas por su mineralogía y por el proceso de triturado (forma, superficie, estructura, porosidad y tamaño del árido), mientras que sus propiedades químicas estarán definidas, principalmente, por su procedencia y composición mineralógica. Así, por ejemplo, se encuentran áridos silíceos, como cuarzos y granitos, formados por compuestos polares inorgánicos, cuyas propiedades permiten que sus superficies sean levemente ácidas. Diferente es el caso de los áridos calizos o mármol, que están formados, en un alto porcentaje, de carbonato de calcio que permite que las superficies sean levemente básicas. En el caso del ligante asfáltico, sus propiedades físicas van relacionadas con su consistencia, la cual depende, principalmente, de la temperatura a la que se encuentre por tratarse de un material viscoelástico termo-dependiente, presentando un comportamiento sólido elástico a baja temperatura y líquido viscoso a altas temperaturas [14]. Desde el punto de vista químico, el ligante asfáltico es una mezcla de muchos compuestos orgánicos, en su mayoría hidrocarburos, que varían en estructura y peso molecular [15]. Adicionalmente a los hidrocarburos, los ligantes asfálticos contienen compuestos orgánicos polares, tanto ácidos como básicos. En la mayoría de los ligantes asfálticos existe un exceso de compuestos ácidos en relación a los compuestos básicos [14].

Estas características de los materiales constituyentes de las mezclas asfálticas influyen en una mayor o menor adhesión que puede haber entre ellos, puesto que, como se ha señalado en las teorías de adhesión, esta mezcla de propiedades influye en el grado de adhesión entre estos materiales [13]. Un ejemplo de lo comentado se observa en la Figura 6, que señala las diferencias registradas en el comportamiento de las uniones árido-ligante consecuencia de las propiedades de los materiales [16]. En esta figura se observan las pérdidas de desgaste en el ensayo cántabro (fallas cohesivas,

adhesivas o mixtas) para tres tipos de áridos con diferentes características. Los áridos AF1 y AF2 son de origen fluvial y poseen las mismas características mineralógicas y químicas entre sí, pero con distinto patrón de forma y textura, siendo el árido AF1 aquel que posee mejores propiedades de forma y textura. Por otra parte, el árido AC es un árido de cantera, con un patrón de forma muy similar al árido AF1, pero con un grado menor de acidez producto de su mineralogía.

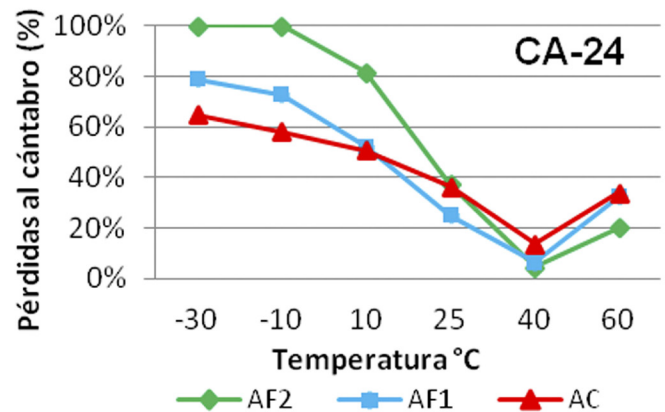


Figura 6: Curvas de estado unión árido-ligante de tres tipos de áridos con ligante CA-24. Fuente: [16]

3.2. Diseño de la mezcla: Granulometría, contenido de ligante y espesor de recubrimiento

Existe una influencia directa en el comportamiento de las uniones árido-ligante de una mezcla asfáltica por efecto de la granulometría de los áridos. Las mezclas que presentan una granulometría más continua, poseen una menor superficie específica de los áridos envueltos con el ligante en contacto con los agentes atmosféricos que deterioran dichas uniones, retardando así el envejecimiento de éstas y, por tanto, la fragilidad de los puentes de adherencia entre el árido y el ligante de la mezcla [17]. Los agentes atmosféricos que deterioran los puentes de adherencia árido-ligante y que contribuyen al envejecimiento del ligante, y en consecuencia a su fragilidad, corresponden principalmente al oxígeno y los rayos UV que producen la volatilización de las fracciones livianas del ligante. Como resultado del proceso de envejecimiento, el ligante se torna frágil y propenso a sufrir daño por humedad, por lo cual, mezclas más porosas y con huecos interconectados en la matriz, se verán más afectadas por dichos agentes debido a la mayor exposición. El contenido de ligante en la mezcla es un factor muy importante en el comportamiento de las uniones árido-ligante en la matriz de una mezcla asfáltica. El contenido de ligante debe ser el óptimo que permita una correcta unión en toda la matriz de áridos componentes de una determinada mezcla, sin producir posibles exu-

daciones ni desprendimientos como consecuencia de un exceso o falta de ligante, respectivamente. Así mismo, el espesor teórico de recubrimiento de los áridos es función del contenido específico de ligante, de la granulometría utilizada y de las características superficiales del árido. Recubrimientos muy finos contribuyen a un envejecimiento prematuro de la mezcla, lo que lleva consigo un incremento en la fragilidad de ésta. Por ello, Kandhal y Chakraborty [18] señalan que para mezclas con un contenido de huecos entre 4 y 5%, los áridos deberían tener un espesor óptimo de recubrimiento entre 9 y 10 micrones. Adicionalmente, el efecto de espesor de recubrimiento de los áridos influye en la susceptibilidad al agua de las uniones árido-ligante. Estos espesores de recubrimiento se confirman con el estudio realizado por Sengoz y Agar [19], quienes llegaron a resultados similares a los obtenidos por Kandhal y Chakraborty, pero evaluando el daño por humedad en las uniones adhesivas de la matriz árido-ligante, señalando que el espesor de recubrimiento óptimo fluctúa entre 9,5 y 10,5 micrones. Estos investigadores señalan que para espesores de recubrimiento menores al rango de 9,5 a 10,5 micrones, las diferencias de resistencia registradas en las uniones árido-ligante, medidas a través del ensayo de tracción indirecta (pre y post inmersión), comienzan a ser mayores a medida que se disminuyen los espesores de recubrimiento.

4. Factores externos que influyen en las uniones árido- ligante

4.1. Efectos del envejecimiento del ligante

El envejecimiento es uno de los factores responsables del deterioro de varias de las cualidades de una mezcla asfáltica. Se ve perjudicada la flexibilidad, la impermeabilidad, la resistencia a la fatiga y la durabilidad. Esto se manifiesta con la modificación de las propiedades del ligante y consta de dos etapas, tal como se observa en la Figura 7: una a corto plazo, producto de la fabricación en planta y los procesos constructivos; y otra a largo plazo, que se desarrolla a lo largo de la etapa de servicio del pavimento [20].

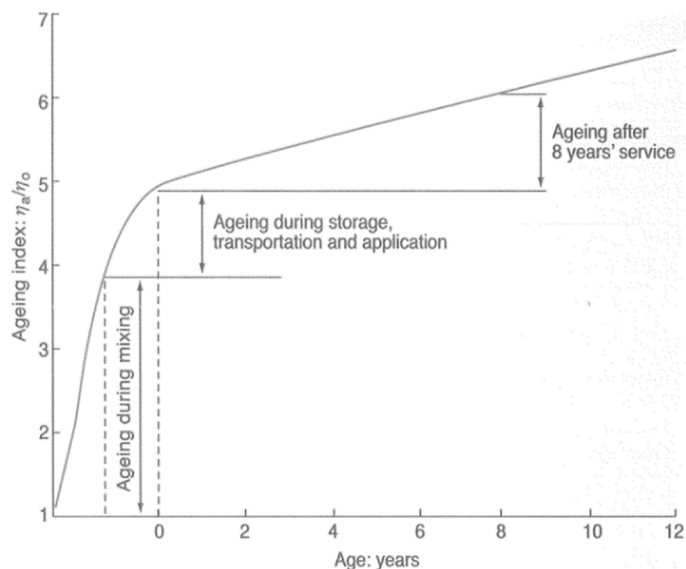


Figura 7: Envejecimiento a corto y largo plazo del cemento asfáltico. Fuente: [13]

El envejecimiento del ligante asfáltico provoca un endurecimiento de los puentes de adherencia o uniones en la matriz árido-ligante, inducido por tres factores esenciales [13] [21] [22] [23]:

1. La pérdida de fracciones livianas por volatilización o por absorción de los áridos porosos.
2. Los cambios en la distribución de fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) y la microestructura molecular del ligante asfáltico debido al proceso de oxidación por la reacción del 2. ligante con el oxígeno de la atmósfera y la exposición a los rayos UV.
3. Finalmente, la reestructuración o empaquetamiento molecular que experimenta el ligante, formando estructuras tipo gel, en condiciones de moderada y baja temperatura durante la vida de servicio de la mezcla en el pavimento.

Durante el proceso de oxidación, se generan compuestos polares como cetonas y sulfóxidos, además de anhídridos dicarboxílicos y ácidos carboxílicos [24]. El aumento de polaridad del sistema, facilita la asociación de especies y su agregación, formando estructuras más compleja a través de reacciones de polimerización de las moléculas del ligante asfáltico, transformándose gradualmente los compuestos aromáticos en resinas y posteriormente en asfaltenos, cuya consecuencia es un aumento de la fracción de asfaltenos y una disminución de compuestos aromáticos, explicando el aumento de viscosidad o rigidización que experimenta el material [25]. Finalmente, los anhídridos y ácidos carboxílicos, corresponden a compuestos solubles en agua, por tanto contribuyentes a patologías asociadas al daño por humedad [26] [27].

4.2. Efectos del agua (daño por humedad)

La acción del agua, ya sea en forma líquida o vapor, puede producir el despegue justo en la interfaz entre el ligante y el árido, es decir, un fallo adhesivo. Esto se produce porque el agua penetra entre el ligante asfáltico y la superficie del árido, reemplazando al ligante como revestimiento del árido, tal como se observa en la Figura 8. Sin embargo, existen estudios que señalan que la ruptura de las uniones puede ocurrir en el ligante o mástico asfáltico, es decir, un fallo cohesivo, o bien también, una combinación de ambos fallos [8] [28].

Se pueden señalar varios mecanismos de fallo asociados al efecto de la acción del agua, los cuales pueden ocurrir de forma individual o conjuntamente. Entre ellos están: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro y abrasión hidráulica.

El desprendimiento ocurre cuando queda una película de agua o polvo en la superficie del árido, aunque el ligante esté recubriéndolo completamente, no existe una adherencia o unión adhesiva entre ambos elementos, pudiéndose desprender fácilmente el ligante del árido.

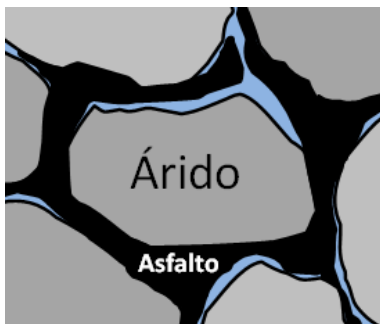


Figura 8: Despegue de película de ligante de la superficie del árido.

El desplazamiento ocurre por una ruptura de la película del ligante cuando el árido está cubierto completamente, o bien producto de un recubrimiento inadecuado. En este caso, una vez que ingresa el agua, el ligante se retrae de la superficie del árido (en mayor o menor grado de acuerdo al grado de acidez del árido), aumentando el ángulo de contacto entre el ligante y el árido, dejando una mayor superficie de contacto de éste último con el agua. En este fenómeno, el envejecimiento actúa como contribuyente, debido a que, tal como se indicó en el apartado anterior, algunos productos de las reacciones de oxidación corresponden a compuestos solubles en agua, los cuales debilitan la película de ligante que cubre los áridos, permitiendo el ingreso del agua a través de microporos debido a la solución de compuestos, o bien a través de microfisuras producto de la fragilización del ligante.

La emulsificación espontánea se produce cuando el ligante se combina con el agua produciéndose una emulsión en la cual el ligante pierde su capacidad adhesiva.

La presión de poro es uno de los mecanismos más importantes en mezclas abiertas o porosas. Ocurre cuando el agua es atrapada en el interior de la mezcla y ésta es compactada por efecto del tráfico, generando presiones internas en el material, que provocan la ruptura de las uniones entre el árido y el ligante.

Por último, la abrasión hidráulica se produce como consecuencia de la acción de las cargas de los neumáticos de los vehículos en zonas donde existen precipitaciones acentuadas. Este es uno de los principales deterioros en pavimentos asfálticos asociados a fallos de las uniones de la matriz árido-ligante.

Los deterioros producidos en los pavimentos asfálticos generalmente son ocasionados, no por un sólo mecanismo de fallo, sino que muchas veces son una combinación de ellos. Sin embargo, algunas patologías están más condicionadas por un tipo de mecanismo de fallo que por otro. En este contexto, se presentan en este apartado algunos de los deterioros más frecuentes en pavimentos asfálticos, producto de fallos ocurridos en las uniones entre el árido y el ligante de las mezclas asfálticas.

Uno de los fallos característicos es el desprendimiento de áridos de la mezcla asfáltica que se observa en la Figura 9. Este deterioro es atribuido, entre otras causas, al fallo de la unión cohesiva o adhesiva de la matriz árido-ligante, producto de la utilización de ligante y áridos con poca afinidad, a la falta de recubrimiento o espesor de ligante, a la utilización de áridos sucios, a la posible presencia de agua durante el extendido de la mezcla.



Figura 9: Desprendimiento de áridos de la mezcla asfáltica. Fuente: [30]

El efecto del envejecimiento del ligante asfáltico produce un aumento del endurecimiento y fragilidad de las uniones de la matriz árido-ligante, por tanto, la mezcla asfáltica es más rígida y susceptible a fallos por fisuración [31]. Entre los fallos por fisuración más frecuentes asociados a este fenómeno se encuentran la fisuración en bloque, la fisuración transversal y la fisuración por fatiga. Los dos primeros fallos son causados principalmente por las tensiones generadas debido a gradientes térmicos, especialmente en mezclas asfálticas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales. La fisuración por fatiga, ocurre con mayor frecuencia en las zonas del pavimento que recibe la mayor parte de las sollicitaciones del tráfico. Este fallo se caracteriza por estar formado de muchos trozos de pavimento de ángulos agudos, que en etapas avanzadas de deterioro forman un patrón geométrico parecido a una “malla de gallinero” o “piel de cocodrilo”, Figura 10.

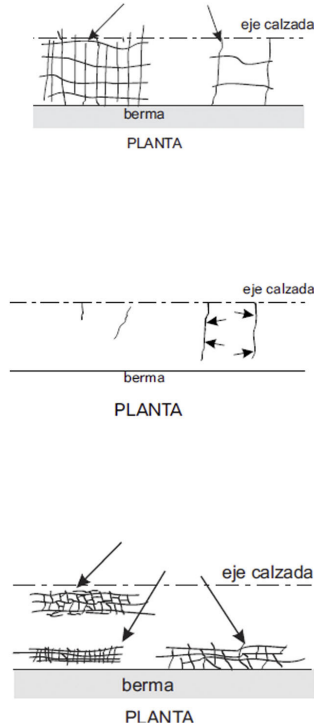


Figura 10: Fisuración de bloque, transversal y de fatiga. Fuente: [32]

Por último, uno de los principales daños de las mezclas asfálticas in situ ocurre cuando se separa el ligante asfáltico del árido debido a la presencia de agua. Este fenómeno se identifica con el nombre de stripping (Figura 11) y puede ocurrir por uno o más mecanismos de fallo asociados a la acción del agua descritos en el apartado anterior. Sin embargo, este deterioro puede acelerarse dependiendo de la interacción química en la unión adhesiva for-

mada en la matriz árido-ligante. En la práctica, si los áridos están completamente secos, se dejan envolver fácilmente por el ligante, en cambio, si los áridos están húmedos, presentan una cierta polaridad cuyo signo depende de si son ácidos con superficies que tienden a ser de carga negativa (-), o básicos con superficies que tienden a estar cargadas positivamente (+). Es decir, los áridos ácidos, que se caracterizan por tener un mayor contenido de sílice, presentan peor adhesividad con los ligantes asfálticos, en relación a aquellos más básicos [33]. Otro factor acelerante de este tipo de patología sería el envejecimiento del ligante debido a la aparición de microporos o microfisuras en la película de ligante que cubre los áridos, permitiendo el ingreso del agua en la interfaz árido-ligante, tal como se explicó anteriormente.

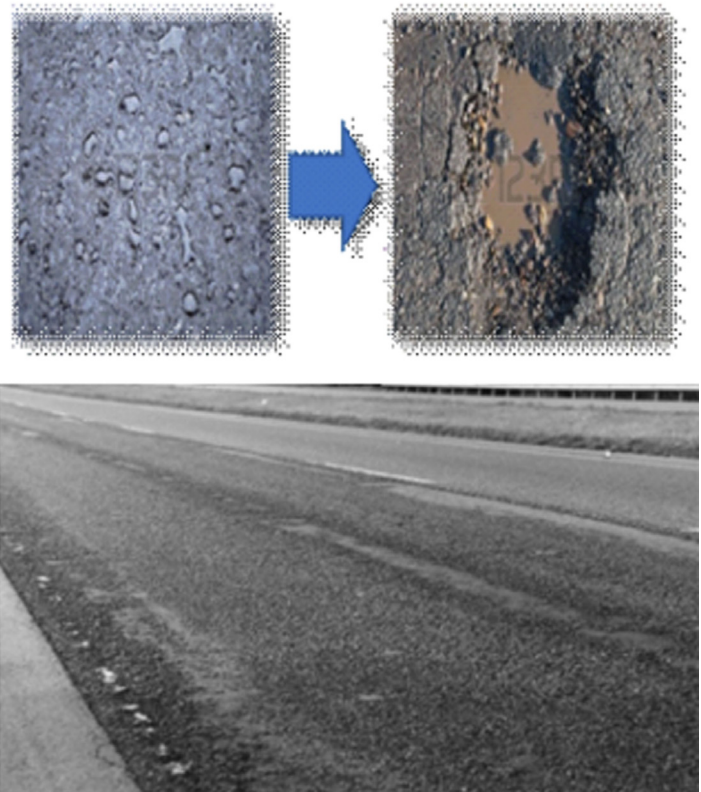


Figura 11: Desprendimiento de los áridos por efecto del agua. Fuente: [34]

6. Conclusiones

Este artículo entrega una revisión, en un lenguaje sencillo, pero manteniendo un cierto rigor técnico, de los principales factores que afectan al comportamiento de las uniones de la matriz árido-ligante de las mezclas asfálticas, que incluyen los conceptos de adhesión y cohesión, las teorías de adhesión, factores internos y externos, junto con los principales deterioros asociados a los mecanismos de fallo. Basados en esta revisión se puede concluir lo siguiente:

Existen variadas teorías que tratan de explicar el comportamiento de las uniones en la matriz árido-ligante. Sin embargo, ninguno de estos efectos, por si solos, puede explicar los deterioros que se presentan en las mezclas asfálticas.

Los fallos adhesivos, cohesivos y mixtos están influenciados por factores internos y externos. Los factores internos dependen de las propiedades de los materiales: árido y ligante, de su diseño y composición en la mezcla asfáltica, y de la interacción química entre ellos. Los factores externos son de origen medioambiental que influyen en el grado de envejecimiento del ligante asfáltico, y que se traduce en uniones más frágiles y susceptibles de rotura, y en el despegue por efecto del daño por humedad.

El fenómeno del envejecimiento afecta el desempeño de las uniones árido-ligante en forma generalizada. Por una parte, contribuye a fragilizar el ligante aumentando el potencial de agrietamiento en cualquiera de sus formas. Por otra parte, debido a la generación de compuestos solubles en agua, producto de las reacciones de oxidación, se generan zonas de fallo a través de microporos o microfisuras por las cuales ingresa el agua a la interfaz árido-ligante aumentando la propensión al daño por humedad.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al programa CONICYT en el marco del proyecto de investigación FONDECYT de Iniciación N°11130723: ASPHALT BINDERS IN AGGREGATE-BINDER MATRIX "AN ADHESION EVALUATION ACCORDING TO THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE AGGREGATE USED".

8. Referencias

- [1] Asphalt-Institute, The Asphalt Handbook, USA: Asphalt Institute Manual Series N°4, 2007.
- [2] H. De Solminihaç, Gestión de Infraestructura Vial, Santiago: Universidad Católica de Chile, 2001.
- [3] T. Scholz, Durability of Bituminous Paving Mixtures, Nottingham: University of Nottingham, 1995.
- [4] F. Jakarni, Adhesion of Asphalt Mixtures, United Kingdom: University of Nottingham, 2012.
- [5] ASTM-D907-96a, Standard Terminology of Adhesives, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2000.
- [6] J. Israelachvili, Intermolecular and Surfaces forces- Third Edition., Elsevier, 2011.
- [7] K. Kanitpong y H. Bahía, «Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA,» Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 611-642, 2003.
- [8] R. Moraes, R. Velasquez y H. Bahia, «Measuring Effect of Moisture on Asphalt-Aggregate Bond With The Bitumen Bond Strength Test,» de Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, 2011.
- [9] R. Terrel y S. Al-Swailmi, «Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: Test selection:Strategic Highway Research Program-Report A403.,» Oregon State University, Oregon, 1994.
- [10] E. Masad, D. Little, L. Tashman, S. Saadeh, T. Al-Rousan y R. Sukhwani, «Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance. Report N° ICAR 203-1,» Texas Transportation Institute, Texas, 2003.
- [11] FHWA, «Aggregate Imaging Measurement System (AIMS),» 2014.
- [12] C. Curtis, K. Ensley y J. Epps, «Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption. SHRP-A-341.,» Strategic Highway Research Program, Washington, 1993.
- [13] J. Read y D. Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition., UK, 2003.

- [14] Asphalt-Institute, The Asphalt Binder Handbook, USA: Asphalt Institute, 2011.
- [15] P. Morgan y A. Mulder, The Shell Bitumen Industrial Handbook, UK, 1995.
- [16] G. Valdés, A. Calabi, R. Miró y R. Osses, «Caracterización funcional de la cohesión de los cementos asfálticos utilizados en Chile mediante el procedimiento UCL,» de XVII Congreso Ibero Latinoamericano el Asfalto, Guatemala, 2013.
- [17] G. Malan, P. Straus y F. Hugo, «A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt,» Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 58, pp. 142-162, 1989.
- [18] P. Kandhal y S. Chakraborty, «Evaluation of Voids in The Mineral Aggregates. NCAT Report Nº 96-4.,» National Center for Asphalt Technology, USA, 1996.
- [19] B. Sengoz y E. Agar, «Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt,» Building and Environment, p. 3621–3628, 2007.
- [20] H. D. Bianchetto y A. I. Asurmendi, «Influencia de la temperatura de fabricación y del contenido de cal en el envejecimiento de mezclas bituminosas: un caso real,» NOVAFIR/1, Ingeniería de pavimentos., pp. 32-33, 2012.
- [21] R. Robertson, Chemical properties of asphalts and their relationship to pavement performance, Strategic Highway Research Program-National Research Council, 1991.
- [22] C. Ouyang, S. Wang, Y. Zhang y Y. Zhang, «Improving the aging resistance of asphalt by addition of Zinc dialkyldithiophosphate,» Fuel, vol. 85, pp. 1060-1066, 2006.
- [23] J. C. Petersen, «Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability,» Asphaltenes and Asphalts, 2, pp. 363-399, 2000.
- [24] A. Calabi-Floody y G. Thenoux, «Controlling asphalt aging by inclusion of byproducts from red wine industry,» Construction and Building Materials, vol. 28, pp. 616-623, 2012.
- [25] X. Lu y U. Isacsson, «Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology,» Construction and Building Materials 16, pp. 15-22, 2002.
- [26] S. Bishara, R. Robertson y D. Mahoney, «Lignin as an antioxidant: a limited study on asphalt frequently used on Kansas roads,» de Transportation Research Board, Washington DC, 2006.
- [27] T. Mill, D. Tse, C. Loo, D. Yao y E. Canavesi, «Oxidation pathways of asphalt,» Fuel Chem., vol. 37, nº 3, pp. 1367-1375, 1992.
- [28] G. Valdés, R. Miró, A. Martínez y A. Calabi, «Effect of the physical properties of aggregates on aggregates-asphalt bond measured using the UCL method,» Construction and Building Materials, pp. 399-406, 2014.
- [29] J. P. Aguiar Moya, «CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS,» Boletín técnico, pp. 1-2, 2014.
- [30] «Ingeniería Civil en El Salvador,» [En línea]. Available: <http://ingenieriasalva.blogspot.com/2009/03/deterioros-de-pavimentos-flexibles.html>. [Último acceso: 24 abril 2015].
- [31] G. Valdés, F. Pérez y A. Calabi, «La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro,» Revista Ingeniería de Obras Civiles- RIOCI, vol. 1, pp. 28-30, 2012.
- [32] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras, Volumen 7, Santiago: Ministerio de Obras Públicas, 2015.
- [33] G. Botasso, O. Rebollo, C. Soengas, M. Balige, A. Bisio y A. Berardo, «Metodología para la Evaluación de Promotores de Adherencia en Cementos Asfálticos,» de XVI CILA- Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Río de Janeiro, 2011.
- [34] FHWA, Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program, Publication Nº FHWA-RD-03-031, USA: Federal Highway Administration, 2003.



LABORATORIO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO INGENIERÍA OBRAS CIVILES
UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA

SERVICIOS DE NUESTRO LABORATORIO

ESTUDIO DE
MECÁNICA DE SUELOS

MUESTREO &
ANÁLISIS DE SUELOS

MUESTREO & ANÁLISIS DE
ÁRIDOS PARA DOSIFICACIÓN DE
HORMIGONES & MORTEROS

TOMA DE MUESTRAS DE
HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

EXTRACCIÓN & ENSAYO DE
TESTIGOS DE HORMIGÓN

ENSAYOS DE RESISTENCIA
MECÁNICA AL HORMIGÓN

ASESORÍAS DE
LABORATORIO

ÁREA MECÁNICA DE SUELOS
ÁREA ÁRIDOS & HORMIGONES

HORARIO DE ATENCIÓN

LUNES A VIERNES 09 A 13 HRS. & 14 A 19 HRS.
AVDA. FRANCISCO SALAZAR 01145 TEMUCO
FONO FAX 45 259 2818 LABMATERIALES@UFRO.CL



rioc.cl