



**UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA**

Facultad
de Ingeniería
& Ciencias





Estimados Lectores:

A la luz de los enormes desafíos a los que constantemente la sociedad se ve enfrentada en distintos ámbitos de su quehacer, el contar con los conocimientos y herramientas que permitan hacer frente de manera exitosa a cada uno de ellos, da cuenta de la responsabilidad y compromiso que debe mover al ser humano. Esta condición sin duda que es aun de mayor relevancia para quienes se desempeñan en el área de la construcción, disciplina que desde el punto de vista técnico requiere del máximo de eficiencia y rigurosidad.

En este contexto, es para nosotros, como institución de educación superior estatal y pública, altamente satisfactorio poder contar con una publicación que dé cuenta de los avances que se están desarrollando hoy día para emplear nuevos métodos de construcción, optimizar recursos y utilizar tecnologías sustentables y cada vez más eficientes. La Revista de Ingeniería de Obras Civiles (RIOC), es un nuevo medio electrónico que pretende ser una valiosa plataforma de consulta y de discusión, para lo cual convoca a investigadores de reconocida trayectoria, tanto a nivel nacional como internacional.

De esta forma, el Departamento de Ingeniería de Obras Civiles de la Universidad de La Frontera, participa en la misión de contribuir al desarrollo de la región y del país mediante la generación y transmisión de conocimiento, asumiendo el compromiso de responder a una sociedad globalizada que demanda propuestas y soluciones eficientes y efectivas.

Esperamos poder cumplir vuestras expectativas y les invitamos a hacerse partícipes en el intercambio de opiniones y experiencias, para ser un efectivo aporte al desarrollo de esta disciplina en nuestro medio.

Dr.-Ing. Cristian Bornhardt B

DECANO

Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración
Universidad de La Frontera



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



RIOCR 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, RIOCR 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, RIOCR 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

Javier Olhoagaray

Alejandra Calabi

Bernardo Valdebenito

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. Cesar San Martín,

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Frontera,
Temuco, Chile.

MSc. Edmundo Muñoz,

Académico, Universidad de La Frontera, Temuco, 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 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. Renato Hunter,

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera,
Temuco, Chile.

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.



Sumario

08. Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras.

Study of Ground Penetrating Radar sensitivity to asphalt mixtures void content in road pavements.

Josep Pedret y Vega Pérez

20. Contaminación en escorrentía pluvial urbana. Aspectos generales.

Contamination in urban pluvial run-off. General overview.

Rodrigo Ugarte

27. La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro.

Cracking in asphalt pavements and damage mechanisms.

Gonzalo Valdés, Félix Pérez y Alejandra Calabi

38. ¿Qué es el hormigón arquitectónico?

What's architectonic concrete?

Guillermo Lira

48. Diagnóstico preliminar al estado de oportuno pago en la ejecución de proyectos de infraestructura con financiamiento FNDR.

Preliminary diagnosis of timely payment to the state in the execution of infrastructure project financed by the FNDR.

Leonardo Sierra, Clidia Artigas y Rodrigo Osses



Normas de publicación

Documento en word (.doc o .docx), tamaño de hoja: carta, idioma: español o inglés.

Todos los títulos como Introducción, Resultados y discusión, conclusión, etc, deben ser escritos usando letra Calibri 10, negrita.

Los Subtítulos deben ser escritos en Calibri 10, cursiva.

El texto debe ser escrito en dos columnas usando letra Calibri 10, interlineado simple, párrafo justificado

Tabla X – Insertar la tabla después del título
(si es necesario, se pueden insertar notas bajo la tabla usando calibri 8)

Figura X – Insertar la figura y el título debajo en calibri 8

Las figuras deben ser convertidas a un formato comprimido (.png, .jpg) y deben estar alineadas al ancho de una columna.

Instrucciones para las referencias

Calibri 10, interlineado simple, justificado

Citar por número de referencias en paréntesis cuadrado en el orden de mención dentro del texto.

Incluir el número en tabla final de referencias

Ejemplos de formatos de referencia:

Books. Author AB, Author CD. 1998. Title of book. City (ST), Country: Publisher. 00 p.

Book articles. Author AB, Author CD, Author EF. 1998. Title of article. In: Anderson AB, Jones CD, Smith EF, editors. Title of book, 2nd ed. City (ST), Country: Publisher. p 00-00.

Computer programs and databases. Author AB. 1998. ACRONYM title database, version. City (ST), Country: Publisher.

Journal articles. Author AB, Author CD, Author EF. 1998. Title of article. J Agric Food Chem 22:11-33.

Proceedings. Author AB, Author CD. 1998. Title of article or presentation. In: Proceedings Name of Meeting; Date (year day-month); City, ST. City (ST), Country: Publisher. p 00-00.

Reports. Author AB. 1998. Title of report. City (ST), Country: Agency. Contract report EL-93-2.

Theses. Author AB. 1998. Title of thesis [thesis or dissertation]. City (ST), Country: University.

Web sites. Author AB. 2004. Title. www.address.com. Accessed Day Month Year.

ASTM. [ASTM] American Society for Testing and Materials. 1998. Standard practice for conducting toxicity tests with fishes, microinvertebrates and amphibians. In: ASTM. Annual book of ASTM standards, Volume 11.04. Philadelphia (PA), USA: ASTM. E 729-90. p 272-296.

USEPA. [USEPA] U.S. Environmental

El formato puedes descargarse de la siguiente dirección electrónica.

<http://ctt.ufro.cl/rioc/index.php/rioc/index>



Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras

Study of Ground Penetrating Radar sensitivity to asphalt mixtures void content in road pavements

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Pedret Rodés J.1 y Pérez Gracia V.2

**1,2Universidad Politécnica de Cataluña, España
josep.pedret@upc.edu, phone: 34-934017271**

Historial del
artículo:

Recibido
04-07-2011
Aceptado
07-09-2011
Publicado
01-01-2012

Palabras Claves:
GPR
Radar de subsuelo
Pavimentos
asfálticos
Ensayos no
destructivos

Article history:

Received
04-07-2011
Accepted
07-09-2011
Available
01-01-2012

Keywords:
GPR
Ground penetrating
radar
Asphalt pavements
Non
destructive testing

Actualmente, uno de los métodos no-destructivos más efectivos para determinar el espesor de un firme es la prospección mediante radar de subsuelo (Ground-Penetrating Radar, GPR), ya que permite la adquisición de datos con una resolución adecuada, a velocidades que no impiden la utilización de la vía al resto de usuarios. Este método de prospección, basado en la detección de discontinuidades electromagnéticas en el interior de un medio, permite registrar el tiempo de propagación de una señal electromagnética, desde que se emite hasta que se recibe tras su posterior reflexión en la discontinuidad. El registro de tiempos, cuando se puede determinar la velocidad de propagación, se utiliza para calcular espesores de capas de la mezcla bituminosa. Sin embargo, la velocidad es un parámetro que depende de muchos factores: materiales del medio, frecuencia de la señal, porosidad, grado de saturación, etc. Esta dependencia hace que, sobre todo cuando la adquisición de datos se realiza sobre capas de firme sometidas a ciclos de carga, se pueda introducir una cierta indeterminación en el cálculo de los espesores debido a posibles cambios laterales en las características físicas del medio, pudiendo producirse un aumento de la velocidad si en las capas inferiores se produce un aumento del índice de huecos. En este estudio se analiza el efecto del contenido de huecos en la composición de las mezclas bituminosas, en la velocidad de propagación de ondas electromagnéticas. Para ello se analizan firmes que presentan diversos estados de conservación. Los resultados permiten asociar los índices de huecos más elevados con velocidades de propagación superiores a las esperadas en los materiales del medio. En este artículo se proponen algunas posibles correcciones que permiten obtener una interpretación de los registros más precisa.

Abstract

At the present, ground penetrating radar (GPR) is considered one of the most effective methods to evaluate thicknesses of pavement roads, because data acquisition velocity can be enough to allow the use of the road to the users, without significant lost of resolution. The purpose in a GPR survey is to detect electromagnetic discontinuities existing in a medium. Radar data is represented as changes in the signal amplitude, referred to the time of propagation and the trace position. The two-way travel propagation time is converted into depth by knowing the wave velocity. However, velocity is a parameter difficult to determine because of its dependence on many factors: mineral grain, signal frequency, porosity, water content, etc. The uncertainty on the relation between physical parameters and the velocity produces also indeterminacy on the estimation of pavement thicknesses, especially as the survey is carried out on roads under heavy and continuous loads. In these roads, unexpected changes in the velocity could be produced due to lateral changes in the porosity of the lower layers of the pavement.

In this paper, the effects of the bituminous materials porosity on the wave velocity are evaluated. In this way, several road pavements, presenting different conditions, are surveyed with GPR. Results allow defining a relationship between the bituminous porosity and the wave velocity, obtaining higher values than the expected ones in the case of layers with significant porosity. Some experimental relationships are used to correct the thickness estimation of the layers, in order to consider lateral changes in porous or voids.

1. Introducción

Una capa de mezcla bituminosa, cualquiera que sea su situación en el firme, está compuesta por un elevado contenido de árido, el ligante (betún) que lo recubre, y un número determinado de huecos, más o menos elevado en función del tipo de mezcla y del proceso de compactación que haya sufrido.

Los porcentajes de mineral y ligante suelen ser similares en la composición de cualquier mezcla, siendo la relación del ligante respecto al conjunto alrededor del 4% en mezclas gruesas y del 5% en mezclas con tamaño máximo de árido más fino. Sin embargo, el número de huecos de una capa presenta una mayor variación en función de la mezcla y su posición en el firme. Mientras que para una capa intermedia, se suele usar una mezcla cerrada con un porcentaje de huecos en torno al 3-4%, una capa de tipo base suele presentar una relación de huecos alrededor del 8-9%. Por otro lado, una mezcla de tipo abierta utilizada comúnmente como capa de rodadura, debe presentar un contenido de huecos mínimo del 12%.

Además, se sabe que el proceso de fatiga en un firme flexible en servicio favorece la aparición de microfisuras por flexotensión en las capas inferiores de mezcla, propagándose a medida que se incrementa el número de ciclos, hasta llegar a la superficie [1,2]. Estas fisuras suelen aparecer y propagarse a través las zonas de contacto entre áridos, donde el ligante que los recubre ya no es capaz de soportar las deformaciones producidas por el paso de vehículos en la calzada.

Los métodos analíticos tradicionales utilizados para el diseño de refuerzos en firmes flexibles analizan la función estructural del conjunto del firme, calculándola a partir de las variables espesor y módulo de rigidez de cada una de las capas del firme, obteniéndose la primera a través de la extracción de testigos y la segunda de los resultados obtenidos mediante ensayo de deflectometría. Sin embargo, dada la necesidad de minimizar los efectos indeseados que produce la extracción de testigos en un pavimento asfáltico, la tendencia es utilizar indicadores alternativos asociados al cuenco de deflexiones obtenido mediante un ensayo con deflectómetro de impacto (FWD). Este hecho, aunque permite omitir la necesidad de conocer el espesor de las capas que forman las estructuras, añade ciertas incertidumbres en los métodos de cálculo de tipo iterativo como el cálculo inverso.

Por este motivo, se ha introducido el uso del "Ground Penetrating Radar" (GPR) como ensayo no destructivo de apoyo en los estudios de firmes y de pavimentos [3,4,5,6], ya que permite obtener el espesor de las capas del firme, reduciendo variables independientes en los cálculos, disminuyendo así sus niveles de incertidumbre.

Este método de prospección geofísica de reflexión de señales electromagnéticas, se basa en la obtención de los tiempos de propagación de una onda que atraviesa un medio material delimitado por dos discontinuidades electromagnéticas. La señal se refleja en estas discontinuidades, de tal manera que es posible registrar dos reflexiones continuas, identificables y medibles. La velocidad de la señal en el interior de un medio depende, entre otros factores, de la presencia de huecos. En medios secos, esta velocidad aumenta conforme aumenta la porosidad del medio. En medios porosos saturados o con un alto grado de saturación la velocidad disminuye drásticamente, comparada con la resultante en medios con bajo grado de saturación o secos. Esto es debido a que en el aire la velocidad es próxima a los 30 cm/ns, en minerales está situada entre los 11 cm/ns y los 15 cm/ns, y en el agua es cercana a los 3 cm/ns.

Es necesario considerar estos cambios en la velocidad debidos a variaciones en la porosidad y en el contenido de agua del medio cuando se utiliza este método para calcular el espesor de una capa de mezcla bituminosa ya que la presencia de aire (huecos, grietas y deterioro en general) en determinadas capas del firme, aumentará la velocidad de propagación de la señal, registrando unos tiempos diferentes de los previstos inicialmente.

Por este motivo, aun siendo relevantes las bondades del método, en especial en su aplicación sobre capas de firme nuevas, pueden generarse dudas acerca de su fiabilidad en la determinación del espesor de una capa de mezcla sometida a desgaste por fatiga, donde la mayor presencia de huecos en las capas inferiores, bien por naturaleza de la mezcla o por fisuración de la misma, añaden incertidumbre a la interpretación.

Para una adecuada interpretación de los datos obtenidos con este método, los efectos del desgaste de los materiales sobre la señal registrada son un aspecto que debe considerarse cuidadosamente. Sin embargo, dada la dificultad inherente a esta casuística, son pocas las evaluaciones realizadas. En este campo hay que mencionar los trabajos de [7, 8, 9, 10]. En el primero se realiza una recopilación de diferentes trabajos y resultados en el estudio de capas de pavimento, haciendo hincapié en los efectos de la humedad, del espesor de las diferentes capas y de los defectos de capas inferiores. En el segundo se realizaron experimentos durante la construcción de una carretera, para determinar constantes dieléctricas de 12 tipos de pavimento flexible. En el tercero se analiza la detección de capas de pavimento mediante medidas continuas, comparando resultados con ensayos de laboratorio sobre testigos. En el cuarto se desarrolla una técnica de detección automática mediante GPR de capas de pequeño grosor, respecto de la longitud de onda de la señal. En otros estudios, aunque no directamente relacionados con firmes de carretera, se ha analizado el efecto del contenido de agua en un medio [11, 12, 13, 14], la detección de huecos [15], la resolución de diferentes antenas [16, 17, 18] o el efecto de daños en pavimentos [19, 20].

En los ensayos que se presentan en este trabajo se observa que la velocidad de propagación de onda aplicada a un pavimento bituminoso no es lineal y que es variable en respuesta a la presencia de huecos en una mezcla bituminosa. Este efecto se puede identificar mediante el uso del ensayo de reflexión electromagnética con GPR, aplicado a distintos firmes con secciones constructivas, con distinta relación de huecos en su composición bien sea por la composición de la propia mezcla o bien por causas ajenas debidas a la presencia de fisuras indeseadas.

2. Principios de la propagación de las ondas electromagnéticas

La prospección mediante GPR se realiza emitiendo una onda electromagnética, mediante una antena emisora. La señal se propaga por el interior del medio y se reflejan en las superficies de contacto que separan dos materiales caracterizados por parámetros electromagnéticos distintos. En cada una de estas discontinuidades, parte de la energía que incide se refleja y se propaga hacia la superficie, y parte de la energía incidente se propaga, modificando su dirección, hacia el interior del medio. La señal reflejada alcanza la superficie, donde una antena receptora la detecta y registra su tiempo de llegada. Una completa descripción del método y de sus aplicaciones puede obtenerse, por ejemplo, en Annan [21] y en Daniels [22].

Las discontinuidades electromagnéticas representan cambios bruscos en la permitividad dieléctrica, en la conductividad eléctrica o en la permeabilidad magnética, de manera que en el estudio mediante GPR se detectan estos cambios. Hay que tener en cuenta que estos parámetros dependen en gran medida del índice de poros del medio y del grado de saturación.

Un equipo de GPR consiste en dos antenas (emisora y receptora) o bien en una única antena de conmutación (parte del tiempo emite y posteriormente conmuta y pasa a tener una función receptora), y una unidad central que controla la emisión y recepción y que puede estar unida a un ordenador donde quedan registradas las llegadas de la señal. Este equipo suele ir conectado a algún dispositivo que permite posicionar los puntos del perfil. Puede ser un odómetro o un GPS. Para realizar la adquisición de datos, una metodología habitual es desplazar el equipo por la superficie del medio que se desea estudiar, emitiendo y registrando las señales con una frecuencia que selecciona cada usuario en función de las necesidades del estudio y que puede permitir una separación entre pulsos de varios centímetros o de, incluso, medio centímetro. Con esta forma de adquirir datos se obtiene una pseudosección del interior del medio, que, en función de los parámetros de adquisición seleccionados, puede considerarse un perfil continuo. Dependiendo de la resolución que se desee

obtener y de la profundidad que sea necesario alcanzar, la velocidad de adquisición de datos puede estar comprendida entre los 40 km/h y los 80 km/h.

En el caso de la evaluación de un pavimento asfáltico, la señal registrada mostrará un incremento en la amplitud correspondiente a las ondas reflejadas que alcanzan de nuevo la superficie. De este modo, cada incremento de amplitud observado de forma continua a lo largo del perfil puede indicar la existencia de una superficie reflectora que, posiblemente, estará asociada con el contacto entre capas diferentes. Elementos de pequeño tamaño, como oquedades u objetos embebidos en el interior del medio, también pueden quedar registrados como una anomalía en la señal de radar, correspondiendo también con un aumento de la amplitud registrada. Un esbozo de este funcionamiento se detalla en la figura 1.

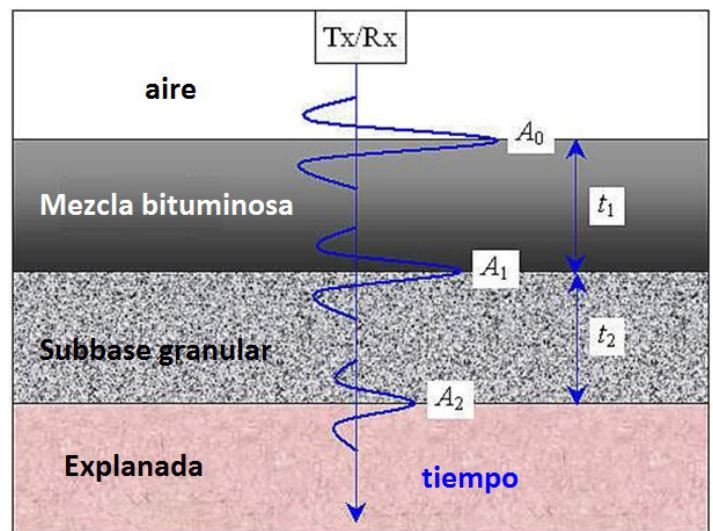


Figura 1. Esquema que muestra la propagación de una señal por un medio de tres capas, representando los incrementos de amplitud que se producen debido a la reflexión en las superficies de separación (modificado de [23]).

En esta figura se esquematiza la forma en la cual la señal que emite la antena Rx se propaga por el interior del medio y se refleja en las superficies que se corresponden con zonas que presentan cambios bruscos en los parámetros electromagnéticos. Estas superficies se asocian en el radargrama con anomalías generadas por un aumento de la amplitud de la señal. En esta figura A0 es la amplitud de la señal reflejada en la superficie del pavimento, A1 es la amplitud de la señal que se refleja en el contacto entre la mezcla bituminosa y la parte superior de la base granular, A2 es la amplitud de la señal reflejada en la superficie de separación de la base granular con la subrasante. El tiempo t1 se corresponde con el incremento de tiempo doble registrado entre las anomalías correspondientes a la reflexión en la superficie y la reflexión en el primer contacto. El tiempo t2 se corresponde con el incremento de tiempo doble entre los el primer contacto y el segundo.

Para realizar la conversión del tiempo doble de propagación reg-

istrado a espesores y profundidades, es necesario conocer la velocidad de propagación de la señal (v). Este proceso, una vez determinada esta velocidad, podría ser automático en el estudio de pavimentos si la mezcla bituminosa fuese continua y homogénea. Sin embargo, esta condición nunca se cumple dado que la mezcla bituminosa está formada por varias capas, que han sido extendidas y compactadas bajo unas condiciones físicas diferentes, presentando además, diferentes composiciones granulométricas y de contenido en huecos. Por este motivo se debe considerar que en un pavimento existen materiales en una misma capa con propiedades dieléctricas diferentes, de tal manera que la señal registrada presentará un comportamiento distinto en cada zona. En consecuencia, la velocidad de propagación podrá verse alterada dentro de una misma capa del mismo pavimento. Esto hace que los tiempos registrados para la señal reflejada en las discontinuidades del medio pueden cambiar aunque la discontinuidad sea la misma y la capa presente un espesor constante. Si estos cambios en la velocidad no se tienen en cuenta, se realizará la conversión de tiempo doble en profundidad utilizando un valor de la velocidad constante. El resultado será una interpretación en la que se habrá introducido un error importante en el espesor de las capas en determinadas zonas. El objetivo de este trabajo es analizar la relación entre el índice de poros de una mezcla y la velocidad de propagación de la señal, de manera que, en ensayos posteriores, puedan realizarse correcciones que mejoren la interpretación de los registros.

La velocidad de la señal por el interior del medio depende de la permitividad dieléctrica (ϵ_r), de la permeabilidad magnética (μ_r), de la conductividad (σ) y del pulso de la señal (ω). En medios no magnéticos y bajas pérdida ($\sigma \ll \omega\epsilon_r$), como es el caso de las mezclas asfálticas, la velocidad puede considerarse únicamente en función de la permitividad dieléctrica relativa:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Donde c es una constante correspondiente a la velocidad de propagación de una onda electromagnética por el vacío (aproximadamente, 30 cm/ns).

Por lo tanto, en este tipo de medios, conocido el valor de ϵ_r , es posible determinar la velocidad de propagación de la onda, que puede representarse mediante una curva (figura 2), en la que dos valores extremos serían $\epsilon_r = 1$ (para el aire) y $\epsilon_r = 81$ (para el agua). En estudios de firmes flexibles, los valores de la permitividad dieléctrica relativa de las mezclas bituminosas suelen estar situados entre 7 y 8, aproximadamente [24]:

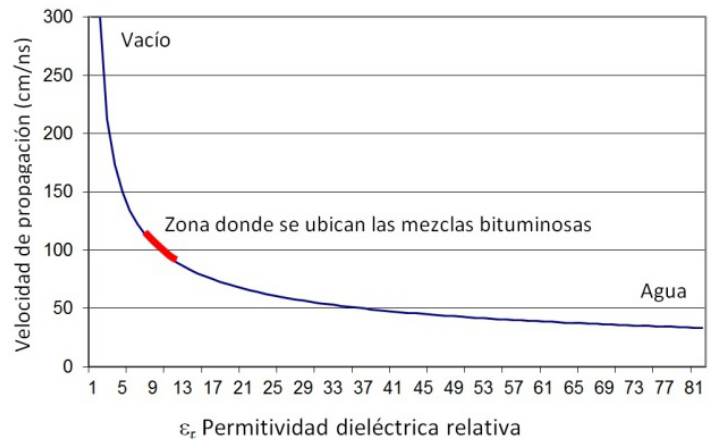


Figura 2. Relación entre la velocidad de propagación de la onda y la permitividad dieléctrica relativa, ϵ_r , del medio.

El primer trabajo riguroso en España para determinar los parámetros electromagnéticos que permiten el cálculo de los espesores de las capas de firme es el publicado en la tesis doctoral de Enrique de Lorenzo en 1996 [24]. En este trabajo se realizan varios ensayos, de carácter cuantitativo para evaluar la viabilidad del uso del georradar en el estudio del espesor de las diferentes capas que forman un firme. Algunos resultados obtenidos en este estudio con una antena apantallada de 900 MHz situada a una distancia de 20 cm de la pista de rodadura, se muestran en la tabla 1:

Para realizar la conversión del tiempo doble de propagación registrado a espesores y profundidades, es necesario conocer la velocidad de propagación de la señal (v). Este proceso, una vez determinada esta velocidad, podría ser automático en el estudio de pavimentos si la mezcla bituminosa fuese continua y homogénea. Sin embargo, esta condición nunca se cumple dado que la mezcla bituminosa está formada por varias capas, que han sido extendidas y compactadas bajo unas condiciones físicas diferentes, presentando además, diferentes composiciones granulométricas y de contenido en huecos. Por este motivo se debe considerar que en un pavimento existen materiales en una misma capa con propiedades dieléctricas diferentes, de tal manera que la señal registrada presentará un comportamiento distinto en cada zona. En consecuencia, la velocidad de propagación podrá verse alterada dentro de una misma capa del mismo pavimento. Esto hace que los tiempos registrados para la señal reflejada en las discontinuidades del medio pueden cambiar aunque la discontinuidad sea la misma y la capa presente un espesor constante. Si estos cambios en la velocidad no se tienen en cuenta, se realizará la conversión de tiempo doble en profundidad utilizando un valor de la velocidad constante. El resultado será una interpretación en la que se habrá introducido un error importante en el espesor de las capas en determinadas zonas. El objetivo de este trabajo es analizar la relación entre el índice de poros de una mezcla y la velocidad de propagación de la señal, de manera que, en ensayos posteriores, puedan realizarse correcciones que mejoren la interpretación de los registros.

material	ϵ_r	λ (mS/m)	Desviación en la estimación de espesores % (n° muestras)
Mezcla bituminosa	7,6 a 8,2	0,001	7,9 % (12)
Zahorra artificial	4,5 a 4,8	0,001	5 % (5)
Zahorra natural	11,2	0,001	5 % (5)
Gravas tratadas	15,9	0,1	> 8% (2)

Tabla 1. Principales parámetros obtenidos experimentalmente para materiales presentes en un firme [24].

3. Ensayos

Las medidas experimentales se realizaron tras una cuidadosa selección de datos necesarios para el estudio y de las zonas a estudiar. También se decidieron los ensayos complementarios para comparar resultados: deflectometría y extracción de testigos.

3.1 Datos necesarios para el estudio

Para proceder a identificar una posible relación entre la presencia de huecos en una mezcla bituminosa y la velocidad de propagación de una onda electromagnética es necesario escoger un conjunto de secciones de firme que deberán ser sometidas a distintos ensayos.

Para maximizar el contraste de los efectos de la presencia de aire en una mezcla bituminosa y que sean visibles en un número mínimo de muestras, se han escogido secciones de firme con un importante paquete estructural, a ser posible con un espesor de mezcla superior a los 30 cm., con presencia de capas abiertas y cerradas en su configuración y en distintos niveles de estado de capacidad estructural. Dicho estado se evaluó mediante un ensayo de deflectometría.

Para ello, se seleccionaron varios tramos de carreteras de alta capacidad, con una sección de firme esperada muy importante, donde se realizaron ensayos continuos de reflexión electromagnética mediante GPR y deflexión mediante deflectógrafo "Lacroix". Además se procedió a extraer selectivamente un conjunto de testigos en los puntos de mayor interés.

3.2. Selección de los ensayos

Cada uno de los tramos de carretera se evaluó utilizando tres ensayos diferentes: GPR, deflexión y extracción de testigos. Los datos procedentes de los dos últimos reconocimientos se utilizaron para comparar los resultados de velocidad obtenidos con GPR en cada sección de mezcla bituminosa de un pavimento asfáltico. Esto ha permitido la validación de los resultados finales considerando la media de la deflexión en el punto de aplicación de la carga mediante un equipo normalizado, el tiempo de propagación de la señal y la medida directa de espesores mediante la extracción de testigos.

Medida del tiempo de propagación de la onda

Los datos obtenidos con GPR se utilizaron para obtener el tiempo transcurrido entre las reflexiones producidas en la superficie del pavimento y en la superficie de contacto entre la mezcla bituminosa y la sub-base granular, sea ésta tratada con cemento o no. La adquisición de datos se realizó de forma continua sobre un tramo de carretera largo, con distintas secciones de firme, a una velocidad promedio de 60 km/h. Esta velocidad se decidió para poder obtener información suficiente del pavimento sin provocar interferencias innecesarias en el tráfico de la vía seleccionada.

Medida de la deflexión en el punto de aplicación de la carga mediante un equipo normalizado

El equipo utilizado para la medida de la deflexión es el deflectógrafo "Lacroix" provisto de una viga Benkelman que mide la deflexión bajo la aplicación de la carga de un eje normalizado de 128 kN con una equidistancia de 5 metros. Dicho eje corresponde a la aplicación de una fuerza de 65 kN utilizado habitualmente en Estados Unidos con el equipo FWD. Los resultados obtenidos se utilizaron en este trabajo para determinar el estado estructural de la sección de firme y buscar correlaciones entre velocidades de propagación de onda y niveles de deflexión.

Medida directa de espesores mediante la extracción de testigos

Se realizó la extracción en puntos seleccionados utilizando los resultados de GPR y de deflectometría. Los puntos de extracción de testigos se seleccionaron en zonas con diferentes niveles de deflexión y que presentan un nivel de regularidad constante en los datos de los dos ensayos previos (deflexión y tiempo de reflexión). De esta forma se pretendía minimizar el posible error de correspondencia en la ubicación física entre la información obtenida por ambos ensayos y el testigo extraído.

3.3. Elección de los puntos donde obtener las muestras mediante extracción de testigos

La extracción de testigos fue un proceso posterior a los dos ensayos, y se realizó en las zonas que se seleccionaron sobre los registros deflectometría y de GPR. En la figura 3 se presenta un ejemplo que muestra los datos obtenidos en un tramo de carretera mediante un diagrama de deflexiones y un radargrama. Los registros se corresponden con un tramo de 1000 m. de la vía rápida C-2 (pk 235-237), en Girona (España). El firme en esta zona presentaba un elevado espesor de mezcla bituminosa.

En el diagrama de deflexiones (diagrama de barras) se presenta la deflexión patrón obtenida mediante la aplicación de una carga normalizada cada 5 m., así como la deflexión característica (dk) obtenida como la media más dos veces la desviación del conjunto de muestras del tramo, y que equivale aproximadamente al percentil 97,5 de todas ellas. Por otro lado, en el radargrama se presenta el tiempo doble de propagación entre las reflexiones producidas en la superficie del pavimento y en la superficie de contacto entre la mezcla bituminosa y la subbase granular.

Comparando ambos diagramas puede observarse una cierta correlación entre el tiempo de reflexión y la deflexión característica. Esta correlación indicaría que, a mayor tiempo de reflexión, menor deflexión. Es un resultado esperado ya que, generalmente, un mayor tiempo de reflexión implica un espesor mayor de capa, asociada a una capacidad portante del firme más elevada.

La extracción selectiva de testigos se realizó para poder definir la relación entre espesores de aglomerado (h) y tiempos de propagación de la señal (t). La relación se obtuvo mediante una regresión de los valores definidos para las muestras extraídas en zonas de deflexión equivalente. Por este motivo los puntos para la extracción de testigos se seleccionaron en las zonas en las que se observa-

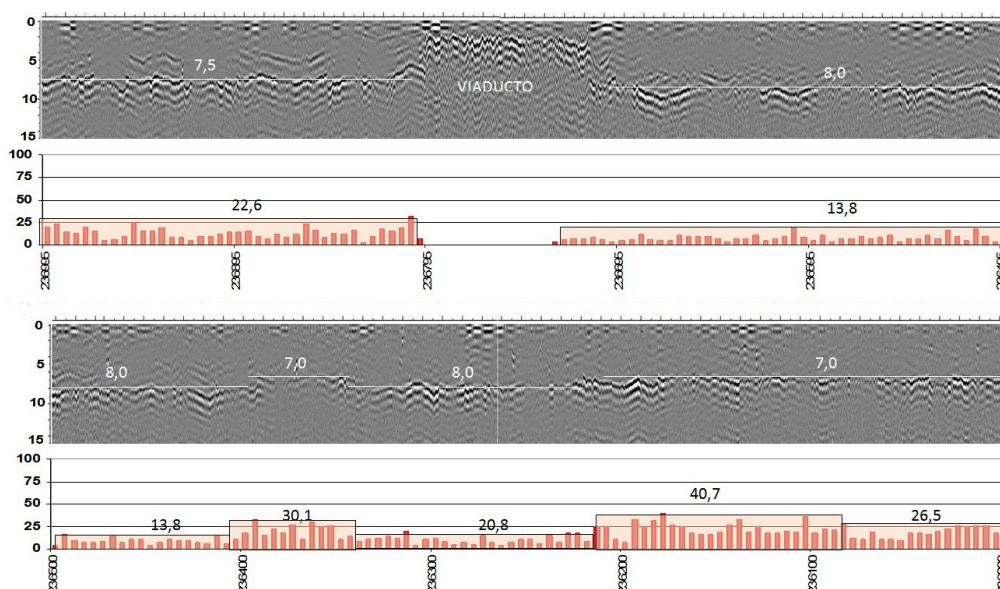
ban tiempos de propagación adecuados a los niveles de deflexión.

En el tramo de carretera mostrado se han marcado tres puntos de extracción de testigos, situados en los pk 236+700, 236+060 y 236+180. Los dos primeros se han seleccionado con el objetivo de obtener dos muestras con el firme en perfecto estado. En estas zonas los tiempos dobles de propagación medidos han sido de $t=8\text{ns}$ y $t=7\text{ns}$, respectivamente, presentando unas deflexiones características bajas ($dk= 13,8$ y $26,5$ mm/100 respectivamente). El tercer punto se seleccionó para evaluar las causas de una deflexión más elevada ($dk= 40,7$ mm/100) en un sector donde el tiempo doble de propagación era también alto ($t=7$ ns):

Como el objetivo del trabajo es observar la influencia de la composición de las mezclas bituminosas en la velocidad de propagación de señales electromagnéticas, se seleccionaron dos carreteras con un elevado nivel de tráfico, cuyas políticas de conservación de firmes hasta día de hoy habían sido dispares. De este modo se aseguraba una cierta heterogeneidad en los datos.

El primer tramo de estudio se realiza sobre el firme de la carretera C-1 ubicada en los accesos a la ciudad de Barcelona (España), entre los pk 8+000 y 14+000. Esta vía, puesta en servicio el año 1991, se construyó sobre una subbase tratada con cemento, y a día de hoy no ha sufrido ningún problema estructural relevante. Las tareas de conservación ordinaria han consistido en el fresado y reposición de las mezclas de rodadura abiertas o, en algunos casos, en la incorporación a la estructura de capas intermedias cerradas. El ensayo de deflectometría ha mostrado niveles de deflexión muy bajos.

El segundo tramo de firme estudiado, se sitúa en la vía rápida C-2 (pk 226-237).



4. Resultados

En los dos tramos seleccionados se procedió a la adquisición de datos y a la posterior extracción de testigos. Los resultados se analizaron teniendo en cuenta los efectos del nivel de huecos y del espesor del firme.

4.1. Análisis de los testigos

La evaluación de los testigos se realizó identificando cada capa y aislando el porcentaje de mezclas tipo abierta o semi-cerrada del resto. Se elaboraron tablas que relacionaban cada testigo con la velocidad promedio de propagación de onda en el conjunto del firme (v), calculada como el cociente entre el espesor total (h) y el tiempo simple de propagación desde la superficie del pavimento hasta la superficie de contacto entre la mezcla bituminosa y la sub-base (t).

a) Caso C-1: en buen estado de conservación

En los testigos extraídos de la carretera C-1, se observan cuatro capas (figura 4): capa de rodadura tipo BBTM 11B abierta (R), capa intermedia tipo AC22binS cerrada (I), capa base 2 tipo AC32baseS cerrada (B2) y capa base 1 tipo AC32baseG semi-cerrada (B1).

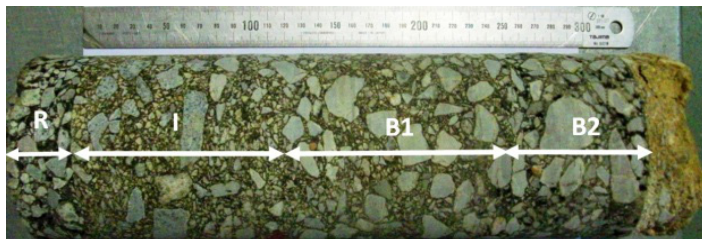


Figura 4. Testigo extraído en la carretera C-1. Se indican las cuatro capas identificadas (R, I, B1 y B2)

Los resultados de todos los testigos extraídos en esta carretera se resumen en las tablas 2A y 2B. En las tablas se muestra el punto de extracción del testigo (pk), su espesor total (h), el tiempo de propagación obtenido con el ensayo de GPR (t), la velocidad estimada como el cociente entre espesor y tiempo de propagación (v), así como el espesor de cada una de las capas identificadas y la relación porcentual de mezclas abiertas o semi-cerradas. Estos datos muestran que las capas de base y rodadura presentan unos valores de espesor más estables, mientras que la capa intermedia es la que sufre una mayor variabilidad respecto a la media del conjunto de firme. Estas características del firme son debidas a la estrategia de conservación seguida. Se observa también que la relación de mezclas abiertas o semi-cerradas respecto del conjunto es muy bajo.

Tabla 2A. Cálculo de la velocidad de propagación a partir del espesor total del testigo (h) y el tiempo de propagación (t).

pk	h (cm)	t (ns)	v (cm/ns)
8+810	29,4	6,1	9,64
9+920	23,8	4,5	10,58
13+010	30,8	6,3	9,78
13+110	26,8	5,4	9,93
8+750	28,3	5,7	9,93
8+600	27,9	5,5	10,15

Tabla 2A. Cálculo de la velocidad de propagación a partir del espesor total del testigo (h) y el tiempo de propagación (t).

pk	R (cm)	I (cm)	B1 (cm)	B2 (cm)	% abiertas o semi-cerradas
8+810	1,7	7,0	12,2	8,5	0,473
9+920	1,6	5,8	11,0	5,4	0,529
13+010	2,4	10,0	12,0	6,4	0,468
13+110	2,9	8,9	10,0	5,0	0,481
8+750	1,6	4,9	12,0	9,8	0,481
8+600	2,0	6,3	12,6	7,0	0,523

b) Caso C-2: en estado de conservación irregular

Los testigos extraídos en la carretera C-2 muestran, en general, cuatro capas. En la figura 5 se presenta una de las muestras sobre la que se indican las capas identificadas: capa de rodadura tipo BBTM 11B abierta (R), capa intermedia tipo AC22binS cerrada (I), capa base 2 (B2) y capa base 1 (B1), ambas de tipo AC32baseG semi-cerrada.

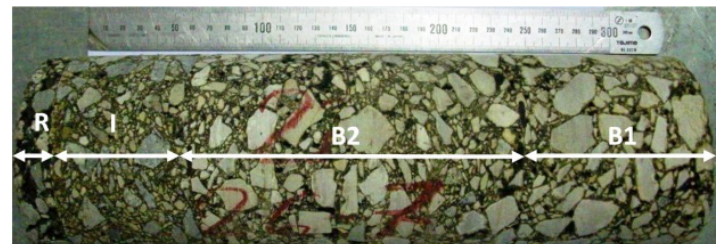


Figura 5. Testigo extraído en la carretera C-2. Se indican las cuatro capas identificadas (R, I, B1 y B2)

Tabla 3A. Cálculo de la velocidad de propagación a partir de “h” y “t”. Valor “dk” correspondiente al punto de extracción.

pk	R (cm)	dk (mm/100)	t (ns)	v (cm/ns)
236+700	45,6	12,4	8,1	11,40
236+180	36,3	40,7	-	(*)
236+060	36,0	26,5	7,0	10,36
235+230	26,1	35,5	5,7	9,12
235+020	27,7	20,1	5,9	9,35
234+810	31,4	29,0	6,4	9,84
233+530	24,3	29,4	5,5	8,83
233+170	25,2	29,2	5,6	8,98
231+640	34,2	27,9	6,7	10,17
230+320	34,3	48,4	-	(*)
230+030	16,7	rígido	4,6	7,32
229+400	34,9	17,7	6,8	10,24
228+790	29,3	26,1	6,1	9,57
227+900	32,7	19,8	6,5	10,00
227+120	33,4	50,2	-	(*)
226+700	32,2	60,8	-	(*)

Tabla 3B. Espesor de cada capa bituminosa y la relación porcentual entre la mezcla semi-cerrada utilizada en el recrecimiento del firme, del resto.

pk	R (cm)	I (cm)	B2 (cm)	B1 (cm)	% abiertas o semi-cerradas
236+700	2,6	10,3	17,5	15,2	(**)
236+180	-	-	-	-	-
236+060	6,9	7,2	8,1	13,8	(**)
235+230	3,0	5,7	3,8	13,6	0,67
235+020	2,9	6,1	4,5	14,2	0,68
234+810	2,8	5,3	9,2	14,1	0,74
233+530	2,3	4,2	13,1	4,7	(**)
233+170	3	4,7	5,9	11,6	0,69
231+640	3,8	3,6	11,7	15,1	0,78
230+320	-	-	-	-	-
230+030	4,0	-	-	12,7	(**)
229+400	3,1	4,5	9,4	17,9	0,78
228+790	2,0	5,3	10,4	11,6	0,75
227+900	3,1	4,0	10,6	15,0	0,78
227+120	-	-	-	-	-
226+700	-	-	-	-	-

4.1. Análisis de los testigos

Se estudió el efecto del índice de huecos del conjunto de la mezcla en la velocidad de propagación obtenida para la señal de GPR en el caso de una carretera con un firme en buen estado de conservación (carretera C-1). Se representó gráficamente la velocidad de propagación de la onda, obtenida como el cociente entre el espesor medido para las muestras directas y el tiempo simple de propagación registrado mediante el ensayo con GPR, respecto del porcentaje de mezclas abiertas o semi-cerradas existentes en el conjunto del firme (figura 6). La gráfica muestra que la relación existente entre ambas variables puede considerarse lineal, obteniéndose una mayor velocidad de propagación en los casos de mayor proporción de mezclas abiertas o semi-cerradas. Mediante una regresión se obtuvo la relación entre estas variables (ecuación 2):

$$v = 11.178 (\% \text{ mezcla}) + 4.494 \quad (2)$$

La relación (2) únicamente puede considerarse como una tendencia observada ya que no se disponen de datos suficientes para definir una relación empírica aplicable a todos los casos de firmes en buen estado de la tipología observada en la carretera C-1.

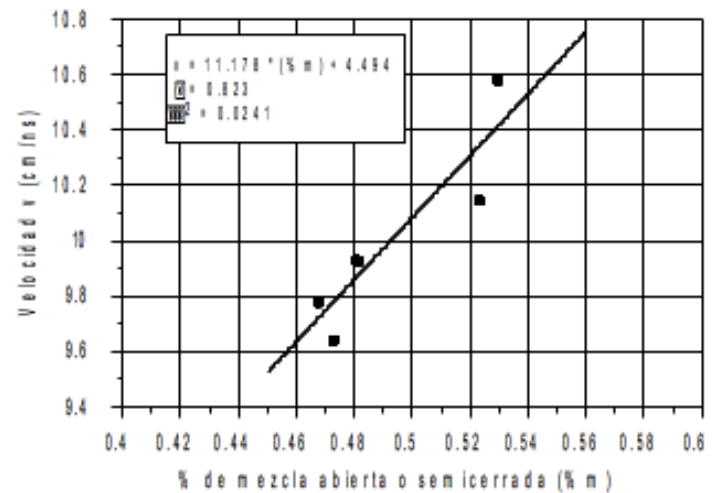


Figura 6. Relación entre el porcentaje de mezcla abierta o semi-cerrada y la velocidad de propagación. La línea continua es únicamente orientativa, y se dibuja con el propósito de mostrar la tendencia de los resultados obtenidos.

Por otro lado, la relación entre la velocidad de propagación de la onda y el espesor total medido en los testigos, muestra la tendencia de la velocidad a disminuir a medida que el espesor aumenta. Es posible que este efecto sea debido a que a medida que aumenta el espesor, también aumenta la proporción de mezclas cerradas respecto del conjunto (figura 7).

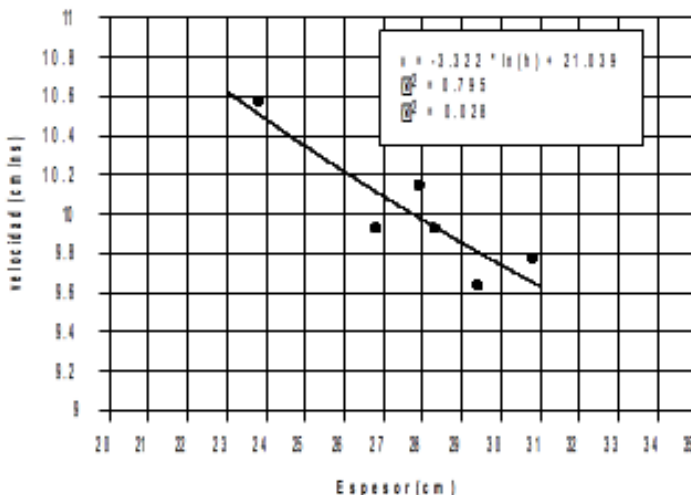


Figura 7. Relación entre espesores y velocidad de propagación. La línea continua muestra la tendencia de los datos experimentales.

Aunque se trata de resultados preliminares y de un número de puntos de medida pequeños, parece que la tendencia observada en la gráfica de la figura 6 es lineal, mientras que la tendencia que se aprecia en la gráfica de la figura 7 parece ser logarítmica (ecuación 3). Esto indicaría que la velocidad de propagación medida en un firme es linealmente dependiente del porcentaje de mezcla abierta o semi-cerrada, pudiendo considerarse la relación entre la velocidad y el espesor de la muestra como logarítmica. En este segundo caso se podría llegar a considerar la existencia de una velocidad estable en el caso de tener un espesor de mezcla infinita, ya que el aporte de una mezcla tipo cerrada al conjunto del sistema sería irrelevante.

$$v = -3.317 \ln(h) + 21.021 \quad (3)$$

Para las muestras dadas, y utilizando las relaciones obtenidas en los ajustes de las variables, se pueden obtener las velocidades previstas.

Los datos de las velocidades de propagación corregidas, v_c , que se muestran en la tabla 4 son valores resultantes de aplicar la ecuación 3 para un determinado intervalo de espesores entre los 20 cm y los 40 cm:

Tabla 4. Velocidades corregidas, v_c , según la aplicación de la relación logarítmica obtenida para el firme de la carretera C-1 (ecuación 3).

h (cm)	V_c (cm/ns)
20	11,09
25	10,35
30	9,74
35	9,23
40	8,78
Δh (cm)	ΔV_c (cm/ns)
20	2,31

De la observación de la tabla se deduce que la diferencia entre los umbrales extremos corresponde a una reducción de velocidad de propagación de 2,31 cm/ns en un diferencial de espesor de 20 cm. Esto indica que, en este firme en presuntas buenas condiciones, la incorporación de nuevos recrecidos de mezcla cerrada al sistema, ha provocado una reducción de velocidad de propagación entorno al 11,5%.

4.3. Efecto del espesor de mezcla bituminosa en la deflexión del firme (carretera C-2)

Para realizar una evaluación aproximada del estado estructural en el que se encuentra el tramo de carretera donde se han extraído muestras se representa la relación entre el espesor medido directamente sobre el testigo h y la dk correspondiente. En las gráficas obtenidas

(figura 8) se observan dos tendencias (tendencias A y B en la figura 8).

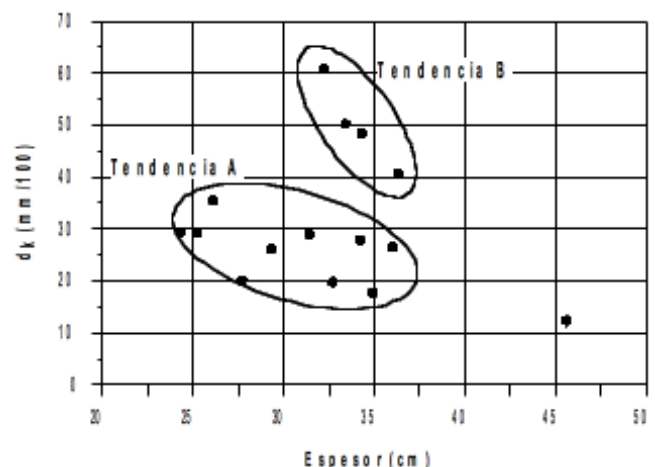


Figura 8. Diagrama de dispersión de las variables h y dk para los testigos de la carretera C-2.

La tendencia A se caracteriza por presentar valores de dk más bajos, lo que se corresponde con una mejor calidad estructural del firme. En este caso se observa que al disminuir el espesor del firme, aumenta suavemente la deflexión, aunque con un elevado grado de dispersión. En el caso de la tendencia B, caracterizada por mayores valores de dk , la deflexión aumenta rápidamente a medida que el espesor decrece.

Las conclusiones que se pueden extraer de estos resultados son que, en el caso de muestras con menor dk (tendencia A), el espesor, aun siendo una variable que incide de forma importante en la deflexión, no es la única. Por otro lado, en el caso de las muestras con peor nivel de deflexión (tendencia B) puede deducirse que el espesor es el factor determinante que produce el incremento de la deflexión. Sin embargo, en el trabajo que se describe en este artículo se consideran únicamente las muestras con deflexiones adecuadas y que, por lo tanto, siguen la tendencia A, omitiendo el resto de muestras. Se ha seguido este criterio de selección porque no es posible asegurar que la elevada deflexión en las muestras que siguen la tendencia B, sea por la existencia de un mayor número de oquedades en el medio, aun siendo por efectos de la fisuración de la propia mezcla. El elevado valor de dk también podría deberse a fallos en la explanada o a la presencia localizada de humedad en la sub-rasante.

Como en el caso de las muestras tomadas en la carretera C-1, la representación de la variable velocidad de propagación de onda (v) en función del porcentaje de mezclas abiertas o semi-cerradas presentes en el conjunto del firme, también muestra la existencia de una relación entre ambas variables. Se observa que; a mayor proporción de dichas mezclas abiertas o semi-cerradas, se obtiene una mayor velocidad de propagación de la onda electromagnética (figura 9). Un ajuste de regresión de los datos experimentales permite obtener una tendencia representada por la ecuación 4. Esta relación debe entenderse como una aproximación experimental a la tendencia observada.

$$v = 9.414 (\% \text{ mezcla}) + 2.750 \quad (4)$$

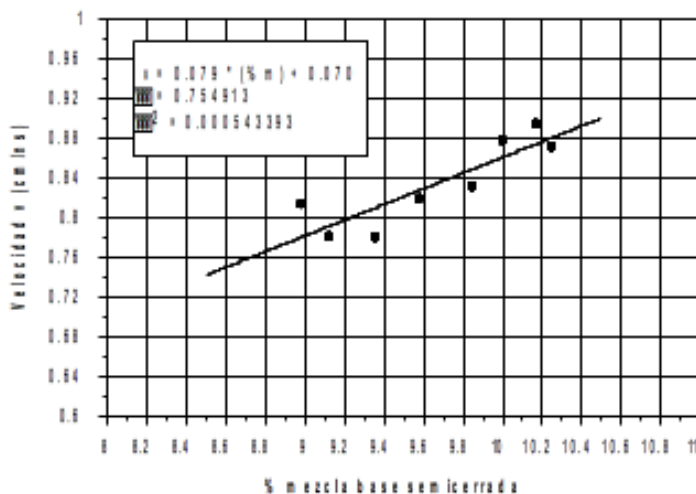


Figura 9: Relación entre la velocidad de propagación (v) y el % de espesor de la base

Por otro lado, si se relaciona la variable velocidad de propagación (v) en función del espesor total medido (h), se observa que la velocidad de propagación tiende a aumentar en el conjunto del sistema a medida que el espesor aumenta. La causa más probable de este efecto es que, a medida que aumenta el espesor del conjunto, también aumenta la proporción de mezclas abiertas o semi-cerradas.

Posiblemente esto se haya producido a consecuencia de la intervención mediante recrido selectivo de la mezcla base de tipo semi-cerrada, realizada en el año 2002, manteniendo la proporción de las mezclas cerradas que forman parte de la capa intermedia y abiertas en el caso de la rodadura.

La representación gráfica de la velocidad (v) en función del espesor medido en los testigos (h), parece mostrar, también en este caso, una relación logarítmica donde, como en el caso anterior, se obtendría una velocidad de propagación estable en el caso de un espesor de mezcla infinita, donde el aporte de una mezcla base de tipo semi-cerrada al conjunto del sistema sería irrelevante. La figura 10 muestra el ajuste realizado. Los puntos se corresponden con los valores experimentales y la curva representada por la ecuación 5 indica la tendencia, obtenida a partir de una regresión.

$$v = 3,815 \ln(h) - 3.324 \quad (5)$$

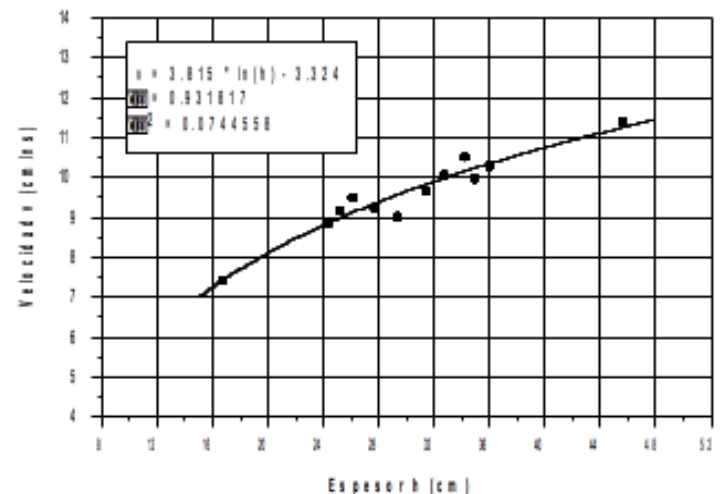


Figura 10. Relación entre espesores (h) y velocidad de propagación (v) en cm/ns.

Finalmente, partiendo de la aplicación de la función logarítmica obtenida mediante regresión, puede obtenerse la velocidad media corregida, v_c , para cada intervalo de espesor considerado. Estos valores se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Velocidades corregidas, v_c , según la aplicación de la relación logarítmica obtenida para el firme de la carretera C-2 (ecuación 5).

h (cm)	V_c (cm/ns)
20	8,10
25	8,96
30	9,65
35	10,24
40	10,75
Δh (cm)	ΔV_c (cm/ns)
20	2,65

De la observación de la tabla se deduce que la diferencia entre los umbrales extremos corresponde a una reducción de velocidad de propagación de 2,65 cm/ns en un diferencial de espesor de 20 cm. Esto indicaría que, en este firme rehabilitado parcialmente mediante la incorporación de mezclas semi-cerradas, el incremento en el porcentaje de uso de dichas mezclas respecto del total ha provocado un incremento de velocidad de propagación entorno al 13,3%.

5. Discusión y conclusiones

Al comparar las velocidades de propagación de la onda electromagnética asociados con cada espesor en las dos carreteras (tablas 4 y 5), puede observarse que el incremento de la velocidad de propagación de onda para el mismo intervalo de tiempo de reflexión de onda es del orden del 15% superior en el caso de la carretera C-2, cuyo firme sufrió un importante proceso de rehabilitación por fallo en la explanada.

Este incremento de la velocidad no parece poder explicarse únicamente a partir del número de huecos presentes en la mezcla bituminosa semi-cerrada utilizada como capa de aporte estructural. Dicho fenómeno podría ser atribuido a la mayor presencia de huecos no indeseados dado el deficiente estado de integridad de las capas de mezcla bituminosa halladas bajo el espesor de recrecimiento.

Como conclusiones específicas aplicadas a casos similares se pueden considerar:

En un firme en buen estado de conservación y sin haber sufrido procesos de rehabilitación importantes, la relación porcentual de oquedades presentes en una mezcla bituminosa es debida únicamente a su sección constructiva, observándose que la velocidad de propagación de la onda aumenta de forma discreta y proporcionalmente con la presencia de mezclas en el firme con un mayor número de oquedades.

Para testigos con deflexiones altas, es necesario realizar un análisis de los cuencos de deflexiones obtenidos mediante FWD, dado que no es posible deducir, únicamente a partir de la velocidad de propagación de una onda, el origen del fallo.

Por tanto, en un firme sometido a actuaciones de rehabilitación, la velocidad de propagación de la onda puede ser más elevada en las zonas donde se haya producido un mayor daño estructural. Dicho efecto podría ser debido a la presencia de huecos indeseados en las mezclas dañadas bajo las capas de recrecido. Este extremo deberá ser confirmado mediante un exhaustivo análisis que permita relacionar los valores de deflexión, cuyos datos puedan ser asociados directamente al estado de la mezcla bituminosa, con el espesor y la velocidad de propagación conocida.

6. Referencias

- [1] Perez-Jimenez F., Valdés G., Miró R., Martínez A., Botella R. 2010. Fénix Test: Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures. Transportation Research Record 2181, Bituminous Materials and Mixtures 2010, Volume 3, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Nº 2181, Publisher: Transportation Research Board, Washington, DC 20001 USA, ISSN: 0361-1981, pp. 36-43
- [2] Pérez-Jiménez F., Miró R., Martínez A. 2007. Analysis of the fatigue process in bituminous mixes. Fatigue critical strain. To: Transportation Research Board 86th Annual Meeting . Washington, DC 20001 USA.
- [3] Lorenzo, H., V. Cuéllar, M.C. Hernández. 2001. Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. Journal of Applied geophysics 47:327-33.
- [4] Al-Qadi I.L., S. Lahouar. 2005. Measuring layer thicknesses with GPR- theory to practice. Construction and Building Materials 19:763-72.
- [5] Lahouar, S., I.L. Al-Qadi. 2008. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. NDT & E International 41(2):969-81.
- [6] Scullion T., Walubita F., Leidy J., Liu W. 2009. Application of the Ground Penetrating Radar (GPR) to Perpetual Pavements. Road Materials and Pavements Design. 10:259-286.
- [7] Saarenketo T., Scullion T. 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics 43: 119-138.
- [8] Al-Qadi, I.L., S. Lahouar, A. Loulizi. 2001. In-situ measurements of hot-mix asphalt dielectric properties. NDT & E International 34:427-434.
- [9] Loizos A., Plati C. 2007. Accuracy of Pavement Thicknesses Estimation Using Different Ground Penetrating Radar Analysis Approaches. NDT & E International Journal 40(2): 147- 157.
- [10] Lahouar S., Al-Qadi I.L. 2008. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. NDT & E International 41: 69-81.
- [11] Laurens, S., J.P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz, G. Arliguie. 2005. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling. Materials and Structures 38:827-832.
- [12] Sass, O., H.A. Viles. 2005. How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls. Journal of Cultural Heritage 7:257-263.
- [13] Klysz, G., J.-P. Balayssac. 2007. Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar. Cement and concrete research 37:1164-1171.
- [14] Dérobert, X., J. laquinta, G. Klysz, J. Balayssac. 2008. Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. NDT&E International 41:44-52.
- [15] Kofman, L., A. Ronen, S. Fridman. 2006. Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records. Journal of Applied geophysics 59:284-299.
- [16] Perez-Gracia, V., R. González-Drigo, D. Di Capua. 2008. Horizontal resolution in a non-destructive shallow GPR survey: An experimental evaluation. NDT & E International 41:611-620.
- [17] Rial, F., M. Pereira, H. Lorenzo, P. Arias, A. Novo. 2009. Resolution of GPR bowtie antennas: An experimental approach. Journal of Applied geophysics 67:367-373.
- [18] Perez-Gracia, V., D. Di Capua, R. González-Drigo, L.G. Pujades. 2009. Laboratory characterization of a GPR antenna for high-resolution testing: Radiation pattern and vertical resolution. NDT & E International 49: 336-344.
- [19] Lorenzo H., Cuéllar V., Hernández M.C. 2001. Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. Journal of Applied Geophysics 47: 327-336.
- [20] Benedetto, A., S. Pensa. 2006. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. Journal of Applied geophysics 62:107-123.
- [21] Annan, A.P. 2002. GPR-history, trends, and future developments. Subsurface Sensing Technologies and Applications 3(4):253-270.
- [22] Daniels, D. 1998. Ground Penetrating Radar. 2nd ed. London, UK: IEE. 723p
- [23] Al-Qadi L., Lahouar S., Loulizi A. 2003. GPR: From the state of art to the state of the practice. Proceedings of International Symposium on Non-destructive testing in civil engineering (NDT-CE). September 16-19, 2003, Berlin, Germany.
- [24] Lorenzo H. 1993. Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.



Contaminación en escorrentía pluvial urbana. Aspectos generales. Contamination in urban pluvial run-off. General overview.

Ugarte Sanhueza R.1

**1Geocat Gestió de Projectes S.A, Barcelona, España.
rugartes@gmail.com, phone: 34-653011940**

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
02-08-2011
Aceptado
02-09-2011
Publicado
01-01-2012

Palabras Claves:
Escorrentía
Pluvial
Urbana

RESUMEN

Los últimos años, se han destinados esfuerzos para, en primer término definir y cuantificar los contaminantes presentes en escorrentías pluviales urbanas, y finalmente definir acciones que permitan administrarlos de tal forma de reducir su impacto en los cauces receptores. El objetivo de este trabajo es describir en términos generales la problemática de la escorrentía pluvial urbana. Para ello se abordan los aspectos generales a tener en cuenta, se muestran resultados de diferentes cuencas para conocer cuantitativamente las concentraciones de contaminantes resultantes en eventos reales de lluvias y finalmente describir los tipos de soluciones para mitigar daños y reducir concentraciones en estos vertidos.

Abstract

In these last years, efforts have been made to define and quantify the pollution present in urban pluvial run-offs, and, to define actions that allow the administration of them in such form to reduce their impact in the receiving channels. The objective of this work is to describe in general terms the problems presented by urban pluvial run-off. For it, the general aspects are going to be considered; the results of different river basins to know quantitatively the concentrations resulting in polluting agents within real rain events, and finally, to describe the types of solutions to mitigate damages and to reduce concentrations in these spills.

ARTICLE INFO

Article history:

Received
02-08-2011
Accepted
02-09-2011
Available
01-01-2012

Keywords:

Run-offs
Pluvial
Urban

1.1 Introducción

En lo que se refiere al estudio de la escorrentía superficial urbana si ha habido intenciones de abordar el tema, normalmente estos esfuerzos se han destinado principalmente, debido a la espectacularidad de los sucesos de inundaciones, y a que los daños que provocan son directos e inmediatos sobre las personas, primero a la determinación de caudales de avenidas y en segundo término a idear y proyectar medidas que permitan recolectar, conducir y luego administrar los altos caudales que se pueden generar ante lluvias incluso de mediana intensidad. Además de este significativo aspecto, y por la necesidad de proteger los medios naturales receptores, el tema ha ido evolucionando hacia el estudio de la calidad de las aguas de escorrentía pluvial urbana. Debido a que pueden arrastrar carga contaminante no menor, y provocar lamentables consecuencias ambientales y estéticas en el entorno del medio receptor. Esta problemática se acrecienta en las ciudades, debido a la impermeabilización propia de la urbanización, además que las actividades que realizamos en ella van acumulando gradualmente contaminantes en superficie.



Figura 1. Vertido de colector de aguas lluvias al medio natural.

Se ha observado que las mayores concentraciones de contaminantes, se presentan en los primeros instantes de la lluvia, es decir, con el arrastre inicial. Y, como es de esperarse, si la lluvia es de mediana intensidad, y provoca, en el caso de redes unitarias, un caudal ligeramente superior al de la capacidad de la planta de tratamiento, esta precipitación aumentará solo sensiblemente la capacidad de disolución del medio receptor, entonces se puede obtener un mayor impacto que con precipitaciones más intensas, donde la capacidad de disolución del medio receptor será mayor. Esta situación se acentúa en el caso de redes separativas, donde todo el caudal proveniente de la escorrentía, generalmente se vierte al medio natural sin tratamiento alguno.

1.2 Discusión

Las precipitaciones en suelo urbano, tienen principalmente dos incidencias, la primera de ellas de tipo cuantitativa, es por esto que los sistemas de drenaje urbanos, superficiales, y subterráneos, tienen como objetivo, evitar o minimizar inundaciones y sus daños. En segundo término, están las incidencias de tipo cualitativas. En el diseño de alcantarillas no se consideraban los contaminantes que llegaban a la red ni tampoco su vertido en el medio receptor. Sin embargo, desde finales de los años sesenta, países con un sistema de saneamiento más desarrollado, como Inglaterra, Estados Unidos, Francia y Dinamarca, entendieron que para tener una buena calidad global en el río es necesario estudiar las descargas de contaminantes en tiempos de lluvia.

En tiempos secos, la cuenca funciona como un depósito de acumulación de contaminantes, los cuales debido a la escorrentía que provocan eventos de lluvia, son arrastrados por la superficie y conducidos por las alcantarillas al medio receptor. Los efectos negativos sobre el medio receptor, son mayores frente a lluvias de intensidad moderada, cuando estas provocan caudales algo mayores a la capacidad de tratamiento de la planta. En las redes unitarias, a la concentración de contaminantes provenientes de la superficie, se agrega la contaminación de las aguas servidas y el arrastre de sedimentos movilizados de la propia red de alcantarillado, que el aumento de velocidades en los conductos de la red, puede generar. Esta mezcla, en teoría no se produce en redes separativas, dado que las aguas servidas y la escorrentía superficial se conducen por sistemas de drenaje distintos. Si a lo anterior, agregamos que los puntos de descarga de estas redes pueden situarse en cursos de caudales bajos, las precipitaciones que provocan el arrastre de contaminantes, también pueden provocar bajos caudales circulantes con un bajo poder de disolución, y por tanto, concentraciones de contaminantes mucho más elevadas.

Existen numerosas sustancias, que contenidas en la lluvia o en la escorrentía, pueden generar cambios en especies animales, plantas o estéticas en el medio receptor. Si estos cambios son inaceptables, las sustancias que producen estos cambios se denominan contaminantes. Entre los contaminantes más habituales, tenemos:

1. Sedimentos. La concentración de sedimentos, está condicionada cantidad de sólidos erosionables que hay en la cuenca. Su presencia en exceso principalmente provoca: un aumento de la turbiedad del agua, reduciendo la transmisión de la luz y con ello el crecimiento de la flora acuática; acumulación en zonas de fondo, limitando las zonas de puesta de los peces; y la alteración de la cadena alimenticia del medio acuático.

2. Sustancias con demanda de oxígeno. El oxígeno disuelto en el agua, necesario para la vida acuática, se consume en parte por las reacciones de oxidación de materia orgánica derivadas de actividades biológicas o químicas. El problema surge cuando la producción de O₂ no alcanza a compensar este consumo. Las consecuencias pueden ser, la reducción de los niveles de oxígeno, por debajo del mínimo necesario para la supervivencia de especies animales. Tendiendo en caso mas extremos, se puede favorecer la formación de zonas bajo condiciones anaeróbicas.

3. Indicadores biológicos. El agua de escorrentía puede contener cantidades importantes de coliformes fecales o totales, bacterias, como la salmonella o el costridium u otras mas peligrosas como la vibrio comma, provocan alteraciones de salud en animales y personas y pueden crear epidemias; tambien puede contener virus.

4. Nutrientes o bioestimulantes. Son sustancias que estimulan el crecimiento de plantas acuáticas y algas. Su crecimiento en exceso puede producir un aumento del consumo de oxígeno durante la respiración nocturna, reduciendo las cantidades de oxígeno disuelto (DO) en el agua por las noches. También puede producir un aumento de las algas en superficie, y favorecer, como la presencia de sustancias con demanda de oxígeno, la formación de zonas anaeróbicas con los problemas de olores, coloración del agua, etc, que implica.

5. Metales pesados. Presentes prácticamente siempre en aguas de escorrentía. Muchos de ellos pueden ser letales si sobrepasan algunos valores de concentraciones máximos. Los metales que se controlan habitualmente son Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Cobre, Hierro, Manganeseo, Mercurio, Niquel, Plata, Plomo, Selenio y Cinc. Aunque los más habituales son el Plomo, Cobre y Cinc.

6. Otras sustancias tóxicas. En el agua de escorrentía puede aparecer, producto de algún vertido tóxico, compuestos plásticos, fenoles y cresoles, pesticidas, herbicidas, aceites, grasas, metales, cloruros, especialmente en zonas donde se usa sal para eliminar la nieve, etc.

Los procesos relevantes en el estudio de vertidos en tiempo de lluvia, son:

1. Acumulación de contaminantes. Previo a días de lluvia se produce acumulación de contaminantes en superficie. Se ha visto mediante medidas de campo, que precipitaciones con intensidades menores a 0.013 mm/h, no llegan a interrumpir el proceso de acumulación.

2. Fuentes de contaminación en zonas urbanas. Entre los contaminantes que se depositan en zonas urbanas se pueden destacar los siguientes: restos orgánicos, restos sólidos de basura y sus lixiviados, sustancias químicas procedentes de procesos industriales, y residuos tóxicos procedentes de emisiones.

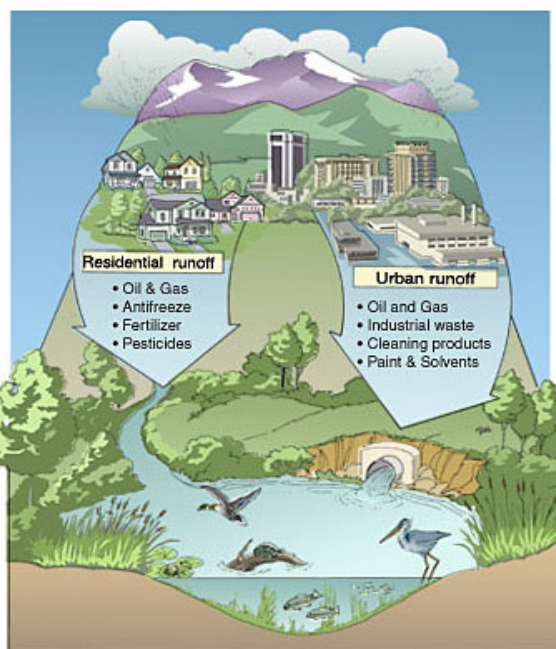


Figura 2 Esquema genérico del origen de vertidos pluviales urbanos.

En 1984 Rexnord Inc., se llevaron a cabo cuatro estudios de la composición escorrentía general urbana, un resumen de los resultados se presentan en laTabla 1 Tabla 1.

Tamaño (µm)	>250	88-250	44-88<	44
Sacramento	1.54	9.07	10.70	78.69
Harrisburgo	6.10	6.70	11.70	75.50
Milwaukee	14.56	7.00	5.84	72.60
Effland	3.58	1.30	8.06	87.06
Media	6.45	6.02	9.08	78.45

Tabla 1. Granulometría de material de escorrentía.

De ellos, se concluye que la escorrentía urbana arrastra las fracciones más finas del total del material depositado.

Además, se ha comprobado que el tipo de pavimento influye en la capacidad de almacenamiento y retención de contaminantes, así los pavimentos asfálticos pueden almacenar más materia contaminante. Otros aspectos que tienen importancia en la carga contaminante, son la presencia de obras, sistema y planes de limpieza, actividades urbanas, condiciones de mantenimiento de pavimentos, etc.

En EE.UU. se ha estimado que más del 80% de los problemas de contaminación en medios acuáticos son provocados por escorrentías urbanas. La precipitación limpia la atmósfera, arrastrando las partículas en suspensión y luego la escorrentía arrastra los contaminantes depositados en superficie.

Las relaciones intensidad-duración de la precipitación que consiguen limpiar el 90% de la carga contaminante en superficie, de acuerdo con estudios de la EPA, se muestra en la Figura 3. Figura 33. Relación Intensidad-Duración de la precipitación que consigue una limpieza de un 90% de contaminantes en vías urbanas.

3. Carga másica. Se define como la cantidad de un contaminante arrastrada por la escorrentía producida por una lluvia, por unidad de tiempo y unidad de superficie. A partir de recolección de datos en distintas cuencas, el National Urban Runoff Program (NURP), impulsado por la EPA, propone cargas másicas medias de tipo orientativo, según distintas clasificaciones del uso del suelo que son de gran ayuda a la hora de realizar una primera valoración de la carga contaminante de alguna zona urbana. En la Tabla 2, se muestran los valores de carga másica medios obtenidos en las cuencas estudiadas. Para estudios específicos, se debe realizar toma de muestras y análisis en la cuenca a estudiar, debido a la alta variabilidad de resultados, en función del lugar específico.

Tabla 2. Cargas másicas anuales según uso del suelo.

Carga másica (kg/Ha/año)							
Uso del suelo	DBO ₅	Sólidos	N Total	P Total	Plomo	Cobre	Cinc
Urbano	50	460	8.5	2.0	0.50	0.20	0.40
Residencial	35	420	6.6	1.8	0.30	0.10	0.25
Comercial	87	840	14.5	2.7	0.85	0.24	1.35
Cultivo	18	450	26	1.05			
Bosque	5	85	3	0.10			
Viales	87	990	13.8	0.7	0.500	0.08	0.47

Las limitaciones para reducir el impacto ambiental provocado por el efluente, se puede abordar desde dos enfoques. El primero, limita directamente el vertido, en cuanto a carga contaminante, frecuencia, volumen, etc. Sin considerar, el medio receptor, y la capacidad de disolución, si la tiene, de este. El segundo se centra en el medio, no solo en el vertido. Considera el medio receptor y sus características, disolutivas. En Chile el Decreto Supremo 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia que establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, y que tiene “como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan en

los medios receptores” aunque limita directamente las concentraciones máximas de contaminantes permitidas considera también el poder de disolución del medio receptor. En cuanto a normas de Calidad, a nivel internacional no ha habido total consenso a la hora de establecer normas para usos como: mantenimiento de la vida piscícola, aprovechamiento de agua con distintos fines, o simplemente la creación o mantenimiento de un entorno agradable para la recreación de la población. En este sentido la referencia usada por varios países es el Manual de Contaminación Urbana (UPM) desarrollado por el Reino Unido para vertidos discontinuos. En el, se definen 5 niveles de calidad, siendo el primero el mas exigente. La Tabla 4, enseña los estandares de calidad, en percentiles para estos niveles.

Los vertidos afectan principalmente al primer par de categorías, RE1 y RE2, en ellos se espera mantener la vida piscícola, en donde una descarga puntual podría provocar la mortandad de los peces. Es por esto que se definen 3 estándares de calidad para vertidos discontinuos, con distintos niveles de protección. Estos son: ecosistemas adecuados para salmónidos (A), ecosistemas adecuados para ciprínidos (B) y ecosistema marginal para ciprínidos (C). Los dos primeros aseguran la protección para toda la vida del pez, mientras que el tercero protege solo a los peces adultos. Las exigencias para oxígeno disuelto de estos estándares, a modo de referencia, se enseñan en la Tabla 5.

Tabla 4. Estándares de calidad (UPM).

Clase	DO % Sat Perc 10	DBO (mg/l) Perc 90	Amonio (mg/l) Perc 90	Amoniaco no ionizado N/l Perc 90
RE1	80	2.5	0.25	0.021
RE2	70	4.0	0.60	0.021
RE3	60	6.0	1.30	0.021
RE4	50	8.0	2.50	
RE5	20	15.0	9.00	

Tabla 5. Estándares exigidos para el oxígeno disuelto para vertidos discontinuos. Concentraciones/duraciones, que no pueden ser superadas más de lo indicado.

Periodo de retorno	Concentración de oxígeno disuelto mg/l								
	1 hora			6 horas			24 horas		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1 mes	5.0	4.0	3.0	5.5	5.0	3.5	6.0	5.5	4.0
6 meses	4.5	3.5	2.5	5.0	4.5	3.0	5.5	5.0	3.5
1 año	4.0	3.0	2.0	4.5	4.0	2.5	5.0	4.5	3.0

Concentraciones/duraciones, que no pueden ser superadas más de lo indicado.

Para reducir los tipos y concentraciones de los vertidos, se pueden realizar actuaciones estructurales y no estructurales. Dentro de las últimas, educar y orientar a la población para que reduzca los depósitos en superficie, parecer resultar conveniente. La Figura 4 (Figura 4, muestra un extracto de un folleto educativo para la población de la EPA Victoria (Environment Protection Authority Victoria's). En su página web se pueden encontrar diversos documentos que tienen como objetivo, primero educar y luego promover la disminución del vertido de contaminantes a la superficie de las ciudades.

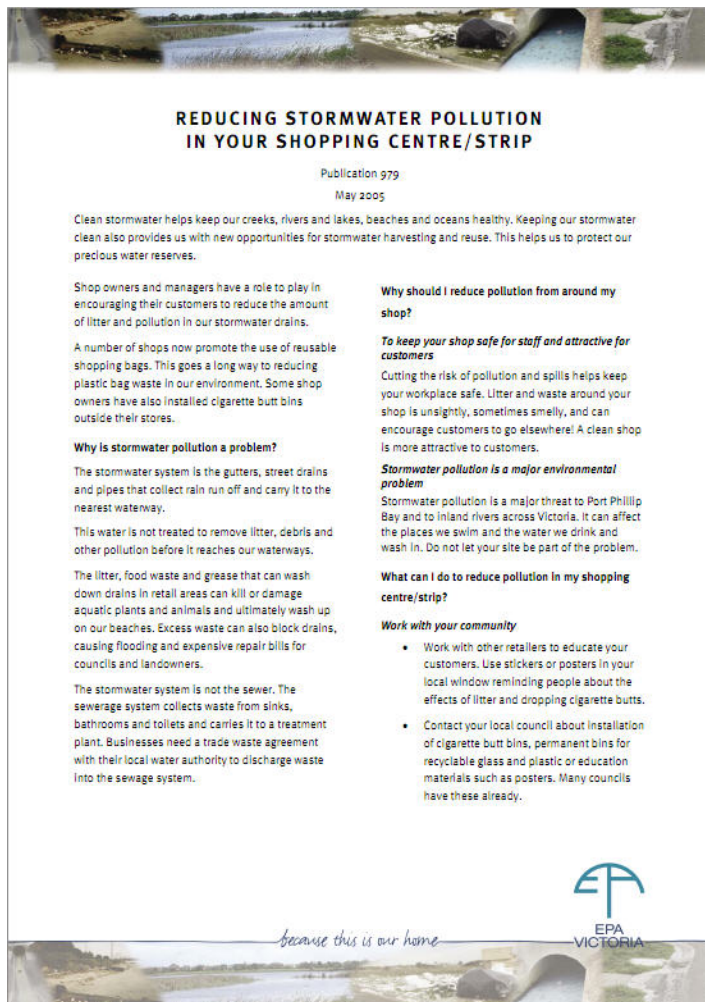


Figura 4. Extracto de ejemplo de un folleto informativo (Environment Protection Authority Victoria's).

Otra técnica de minimización de la contaminación pluvial, son los llamados sistemas TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible). Se ha visto visto que influyen claramente en la disminución de la contaminación presente en la escorrentía superficial urbana. En el artículo "Caracterización analítica de las aguas pluviales y gestión de las aguas de tormenta en los sistemas de saneamiento" se presentan algunos resultados de caracterizaciones analíticas del agua de lluvia en distintos puntos de su recorrido urbano, previamente

a su llegada a la planta de tratamiento o al medio receptor. En él, se midieron contaminantes en el efluente de zanjas de infiltración para la retención de sólidos, metales pesados y nutrientes. Se pudo observar que todos los contaminantes presentes en el agua de escorrentía filtrada por el sistema de TEDUS, presentaron concentraciones claramente inferiores a las del agua de escorrentía superficial urbana. En general se calcula un grado de descontaminación superior al 70%.

Por otro lado, se ha verificado que la mayor carga contaminante resulta en los primeros instantes de lluvias, el llamado first flush. Como es prácticamente imposible tratar todas la escorrentía, por los grandes volúmenes resultantes. Con medidas estructurales, se busca disminuir el first flush, como almacenando al menos los primeros caudales, aún así se necesitarán almacenamiento del orden de decenas de miles de metros cúbicos. Para lluvias moderadas o leves, se puede aprovechar la capacidad de almacenamiento de la misma red, instalando compuertas, presas móviles y dispositivos de control, de tal forma que si la precipitación aumenta, a fin de evitar que colapsen las instalaciones, permita que los caudales circulen de manera normal por la red, vertiendo en el cauce, sí con concentraciones de contaminantes mas bajas dado los mayores caudales. Esta alternativa supone tener una red con una capacidad de almacenamiento importante, tener un acabado conocimiento de toda la red y conocer muy bien su comportamiento hidráulico. Otra alternativa es, realizar el almacenamiento en depósitos de retención creados para este fin. Se trata que en algún punto de la red se intercepten, mediante un elemento de regulación los primeros caudales que excedan la capacidad de tratamiento de la planta. Si estas intercepciones, alcanzan la capacidad del depósito, se permita mediante otro mecanismo del tipo aliviadero el desagüe de estos caudales a la misma red, entonces se tratará en la planta depuradora, hasta alcanzar la capacidad de ésta, si se sobrepasa el excedente, como hasta ahora, se vierten directamente al medio receptor, aunque a menor concentración dado los altos caudales. Una vez termina la lluvia el agua almacenada en el depósito de retención se irá vaciando en la red y serán conducidos a la planta depuradora. De esta forma se retienen las mayores cargas contaminantes, mitigando el impacto en el medio receptor.



2. Conclusiones

La forma como se ha estudiado la escorrentía pluvial incluyendo la variable de calidad del agua al problema de la cantidad nos acerca a la búsqueda de sistemas sustentables, que en este caso no solo busca evitar volúmenes de agua en superficie que generen daños a las personas por inundaciones, sino además conseguido esto, evitar los impactos que las cargas contaminantes puedan generar en el medio receptor. O al menos, conociendo el problema específico, administrar los caudales y sus cargas contaminantes de manera de disminuir las altas concentraciones que afecten a éste. La solución del estanque de retención aparte de permitir laminar la concentración de contaminantes, permite, aunque de forma menor, laminar los caudales puntas, reduciendo de alguna forma los riesgos por inundación. Los sistemas TEDUS, además del efecto de laminación de puntas de caudales, tienen importantes efectos en la reducción en la contaminación, aunque para que lleguen a ser eficientes requieren de acciones colectivas.

Es importante destacar lo importante que es insertar en el colectivo la necesidad de estudiar de forma global el medio ambiente y específicamente las relaciones ciudad- curso fluvial- masa fluvial, ellas deben conocerse, respetarse y los profesionales urbanísticos, y la población en general, deben procurar una sana interrelación entre ellas.

3. Referencias

- Alcobé Picoy, Antoni. 2002. Efecte sobre la qualitat de l'aigua del riu Llobregat en el tram Sant Andreu de la Barca - Mar, dels abocaments en temps de pluja desde les xarxes de clavegueram. Capítulo 4. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gómez Manuel. 2010. Curso de Hidrología Urbana. Barcelona, España. Distribuidora Alfambra de Papelería, S.L, Capitulo 19 y 20.
- Llopart-Mascaró Anna, Gil Alicia, Martínez Montse, Puertas Jerónimo, Suárez Joaquín, Del Río Héctor y Paraira Miquel. Caracterización analítica de las aguas pluviales y gestión de las aguas de tormenta en los sistemas de saneamiento. VI Jornadas Técnicas de Saneamiento y Depuración, Control analítico de la depuración de las aguas residuales, Murcia, 10 y 11 de Noviembre de 2010.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). 1983. Results of the nationwide Urban Runoff Program.
- Rexnord Inc. (1984) "Source and Migration of Highway Runoff Pollutants". Research report para la FHWA (NTIS PB86-227915).
- Direcciones electrónicas
- Asiquim AG (Asociación gremial de Industriales Químicos de Chile). <http://www.asiquim.cl/web/Legistacion/DS%2090-2000%20CONAMA.pdf>. Acceso: Junio/2011.
- Columbia RiverKeeper. <http://www.columbiariverkeeper.org/index.php/headlines/view/86>, Riverkeeper Urges Oregon DEQ to Step Up and Tackle Stormwater Pollution from Cities, <http://www.columbiariverkeeper.org/>. Acceso: Junio/2011.
- The City of Billings, Montana. City Stormwater Program. <http://ci.billings.mt.us/>, <http://ci.billings.mt.us/index.aspx?NID=571&PREVIEW=YES>. Acceso: Junio/2011
- Environment Protection Authority Victoria's, Australia. Stormwater. <http://www.epa.vic.gov.au/>, [https://epanote2.epa.vic.gov.au/EPA/Publications.NSF/2f1c2625731746aa4a256ce90001cbb5/dabe3b5a38a5f2c2ca2570000025538c/\\$FILE/979.pdf](https://epanote2.epa.vic.gov.au/EPA/Publications.NSF/2f1c2625731746aa4a256ce90001cbb5/dabe3b5a38a5f2c2ca2570000025538c/$FILE/979.pdf). Acceso: Junio/2011.



La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro

Cracking in asphalt pavements and damage mechanisms

Valdés Vidal G. 1, Pérez Jiménez F.2 y Calabi Floody A.3

**1, 3 Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile.
2Departamento de Infraestructuras del Transporte y el Territorio, Universidad Politécnica
de Cataluña, España. gvaldes@ufro.cl, phone: 56-45-3256820**

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
05-08-2011
Aceptado
13-10-2011
Publicado
01-01-2012

Palabras Claves:
Fisuración,
agrietamiento.
Pavimentos
asfálticos

ARTICLE INFO

Article history:
Received
05-08-2011
Accepted
13-10-2011
Available
01-01-2012

Keywords:
cracking,
asphalt
pavements,
mechanisms

RESUMEN

Los deterioros por fisuración en las estructuras de pavimentos asfálticos son los más frecuentes en los fallos presentados en las carreteras, y las causas que los originan son diversas. Por ello, este artículo tiene por objetivo entregar una revisión del contexto en el que se enmarca este tipo de fallo, presentando los agentes causantes de este tipo de deterioro, sus tipologías, los diferentes enfoques utilizados para su representación y análisis, y los mecanismos de fisuración observados en las capas asfálticas. Además se efectúa un análisis de los procedimientos experimentales desarrollados que actualmente se utilizan para evaluar propiedades vinculadas a la resistencia a fisuración en las mezclas asfálticas. Finalmente se presenta un nuevo procedimiento desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (España) para evaluar los mecanismos de fisuración en este material.

Abstract

Distresses by cracking in asphalt pavements are the most common in the highways. Cracking is due to several causes. Therefore, the aim of this paper is provide a review of the context on that this failure mode is produced. This paper shows, the causing agents of this distress type, its classification, the different approaches used for its representation and analysis, and the cracking mechanisms commonly observed. In addition, this paper includes an analysis of the experimental procedures currently used to evaluate properties associated with cracking resistance in asphalt mixtures. Finally, a new process to evaluate the cracking resistance in asphalt mixture, developed by The Roads Laboratory of the Polytechnic University of Catalonia (Spain), is shown.

1. Introducción

No cabe duda de que el desarrollo económico y social de un país está estrechamente ligado a un correcto funcionamiento de los sistemas de transporte. Keane en el año 1996, señala que las inversiones en las redes de carreteras tienen un impacto directo a nivel macro y microeconómico en la productividad de una determinada región o localidad de un país, destacando principalmente la influencia directa que tiene un sistema de transporte por carreteras de calidad sobre el empleo y desarrollo industrial de una determinada región, basándose en que las empresas pueden recibir insumos para sus instalaciones de producción, y a su vez, los productos terminados pueden acceder al mercado de manera eficiente. Es decir, un eficiente sistema de transporte permite a las empresas reducir los costos de transporte, lo que reduce los costos de producción, aumentando la productividad y los beneficios. Consecuentemente, Tamames (2003) e Ibarrola (2008), destacan la inversión estatal en construcción y mantenimiento de redes de carreteras como una herramienta de crecimiento económico, generando condiciones de estabilidad en un país. Esto se produce debido a que las inversiones estatales suponen una movilización de recursos que generan una serie de impactos específicos, como el aumento de demanda de otras infraestructuras (p. ej. viviendas), generando imputs en el mercado interno por demanda de materiales como el hierro, acero, cemento y asfalto. Además, se genera un aumento en el PIB del sector de la construcción, estimulando el empleo, y la productividad del sistema económico general, junto con un aumento de las recaudaciones impositivas para el país.

Como se observa, las infraestructuras viales juegan un rol importante dentro del sistema de transporte de cada país, y en éstas, las carreteras son el elemento principal que incide en el desplazamiento de los vehículos que permiten el traslado de personas y mercaderías desde un punto a otro.

El pavimento es una de las partes de la carretera que requiere la mayor inversión de recursos económicos, tanto en su etapa de construcción como en su etapa de mantenimiento. Además, el estado del pavimento influye directamente en la mayoría de los costos usuario de la carretera, aumentándolos cuando su estado no es óptimo, debido principalmente a los aumentos en tiempos de viaje, consumo de combustible y deterioro de los vehículos de transportes, entre muchos otros costos involucrados.

Con el transcurso del tiempo las características iniciales del pavimento van degenerándose, tal cual se ilustra en la Figura 1, provocando de manera progresiva, deterioros que implican la intervención de la estructura mediante tareas de mantenimiento o conservación, o bien, cuando el deterioro es excesivo, se requiere llevar a cabo tareas de rehabilitación o reconstrucción.

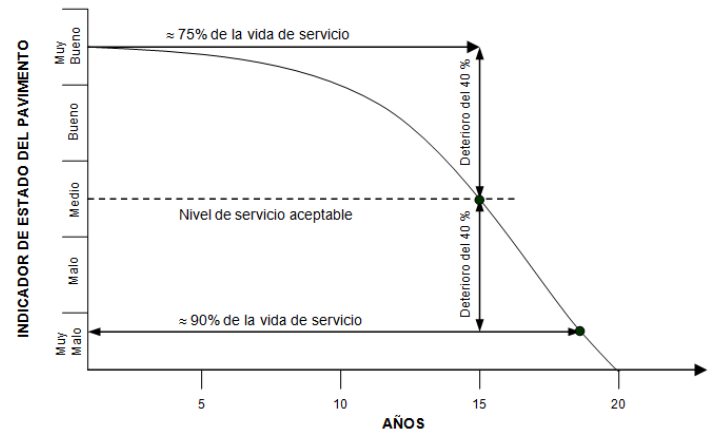


Figura 1. Modelo de deterioro de un pavimento Fuente: De Solminihac, 2001

Debido a las características funcionales y estructurales entregadas, hoy en día, los pavimentos asfálticos son los más utilizados en la construcción de las redes de carreteras de los diferentes países (Figura 2), y de la calidad y diseño de las mezclas asfálticas utilizadas en ellos depende en gran parte su comportamiento en la fase de operación o servicio.

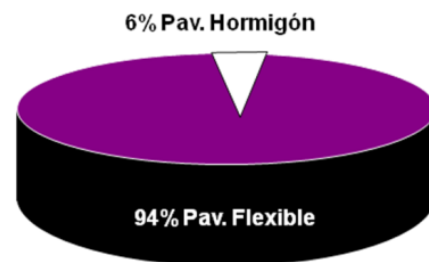


Figura 2. Distribución de tipologías de pavimentos Fuente: FHWA, 2011.

Lo señalado anteriormente también puede observarse en la evolución a nivel mundial de la producción de mezclas asfálticas entre los años 1994 a 2007 para Europa, Estados Unidos y el resto de mundo (Figura 3). Se observa en dicho periodo que Europa ha aumentado su producción en un 25%, pasando de un total de 275,7 millones de toneladas a 342,9 millones de toneladas por año. En Estados Unidos la evolución de la producción de mezclas bituminosas fue más marcada hasta el año 2002, pasando de 459 a 545 millones de toneladas entre los años 1994 y 2002, manteniéndose en los años siguientes la producción en torno a las 500 millones toneladas anuales. A nivel mundial se observa una evolución similar a la registrada en Estados Unidos, presentado el mayor incremento de producción de mezclas en caliente entre los años 1994 y 2002, manteniéndose en los años siguientes la producción en torno a las 900 millones de toneladas anuales.

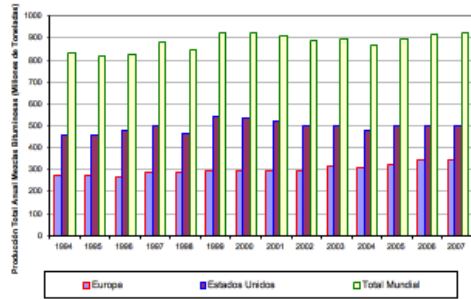


Figura 3. Producción total anual de mezclas asfálticas fabricadas en caliente
Fuente: Asphalt in Figures, 2007.

De acuerdo al panorama presentado en este punto queda clara la importancia de tener buenas redes de carreteras dentro de los sistemas de transportes de cada país. Además los niveles de producción de mezclas asfálticas en Europa, USA y el panorama a nivel mundial en torno a la evolución de su producción, nos permite reflexionar respecto a la magnitud de las inversiones en redes de carreteras, principalmente en las capas superiores de la estructura del pavimento, las capas asfálticas, en las cuales se invierten las mayores cantidades de recursos financieros de los proyectos.

Expuesto lo anterior, resulta necesario desarrollar los conocimientos científicos que permitan asegurar la durabilidad de los pavimentos flexibles durante los períodos usuales de diseño. En este contexto, es necesario comprender las tipologías y los mecanismos de deterioros de las carreteras, de manera tal, que la comprensión de estos fallos permitan diseñar materiales que aumenten su durabilidad frente a los mecanismos solicitantes en condiciones de servicio, optimizando así, las inversiones y los costos de mantenimiento realizados en las carreteras.

De acuerdo a la Federal Highway Association (FHWA), entre los deterioros más frecuentes producidos en las capas asfálticas de las estructuras de carreteras se encuentran las deformaciones plásticas y los daños producidos por la fisuración de las estructuras (Figura 4). La fisuración es el más frecuente en los fallos ocurridos, por lo cual, en este artículo se presentarán los agentes causantes de este tipo de fallo, sus tipologías, los diferentes enfoques utilizados para su representación y análisis, y los mecanismos de fisuración observados en las capas asfálticas. Además se dará a conocer una revisión de los procedimientos experimentales desarrollados que actualmente se utilizan para evaluar propiedades vinculadas a la resistencia a fisuración en las mezclas asfálticas. Conjuntamente se mostrará un nuevo procedimiento desarrollado por Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (España) para evaluar los mecanismos de fisuración en este material.



Figura 4. Tipos de fisuración en pavimentos asfálticos
(Fuente: Kuai et al., 2009)

2. Agentes solicitantes de los pavimentos

Los principales agentes solicitantes de los pavimentos son las cargas generadas por el tránsito y las condiciones ambientales a las que está expuesto el pavimento durante su vida útil.

El tránsito solicitante es un factor de primera importancia a la hora de determinar o predecir el daño en el tiempo que sufrirá un pavimento en un periodo dado. Sin embargo, la caracterización de las solicitaciones producidas por el tránsito sobre los pavimentos es bastante compleja, debido no solo a la variabilidad y periodicidad de los vehículos que lo solicitan, sino también a las interacciones vehículo-pavimento y velocidades de circulación que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas de los vehículos. Un ejemplo de las deformaciones producidas en la base de la estructura de un pavimento asfáltico producto de las cargas del tránsito se puede observar en la Figura 5.

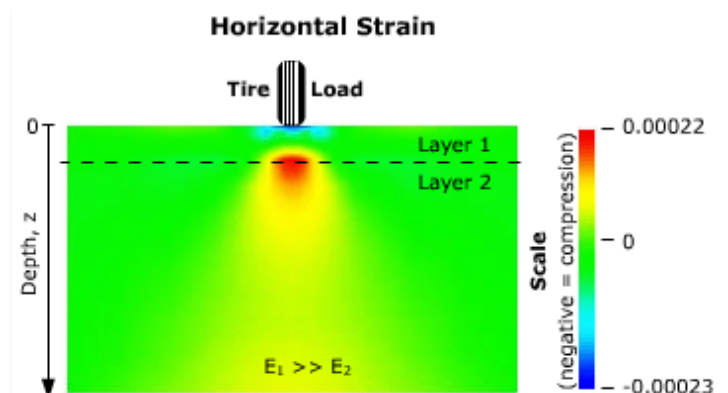


Figura 5. Deformaciones generadas en el pavimento por las cargas del tránsito
Fuente: Pavement Interactive Guide

Por otra parte, las solicitaciones medioambientales tienen también una gran influencia en el comportamiento mecánico del pavimento. Básicamente, dos son los efectos que afectan las características del pavimento, la temperatura y la humedad. La temperatura influye de manera directa en la rigidez del pavimento, ya que a medida que aumenta la temperatura, la capa superior del pavimento se vuelve menos rígida y cuando disminuye se incrementa la rigidez de esta capa.

A su vez, la temperatura también afecta a los estados tensionales del pavimento, puesto que cuando bajan las temperaturas se generan altas tensiones superficiales de retracción en la superficie del pavimento, tal cual se observa en la Figura 6.

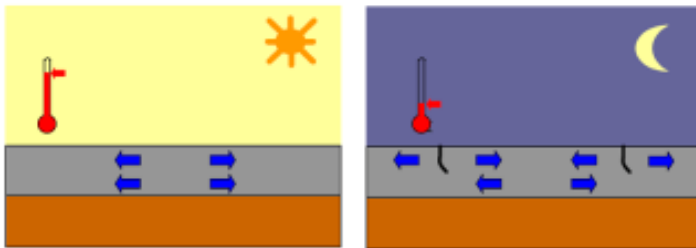


Figura 6. Tensiones generadas por variaciones térmicas
Fuente: Martínez, 2006

Por otro lado, se encuentra la humedad, la cual tiene una gran influencia en la adhesividad entre los materiales componentes de las capas asfálticas, junto con ser el origen de los posibles fallos en la estructura de pavimento producto de la infiltración de agua en sus capas inferiores.

Existe a su vez, un efecto combinado entre la temperatura, la radiación solar, la humedad y el aire que produce una oxidación del ligante de la mezcla asfáltica a través del tiempo, que implica un aumento de rigidez de la mezcla, y por ende, un aumento de fragilidad de ésta, haciéndola más susceptible a fallos por fisuración. Ambos agentes solicitantes, tanto las cargas de tránsito como las condiciones medioambientales, junto con ser los factores que dan lugar a los principales tipos de fallos en las carreteras, en modo conjunto tienen un efecto directo sobre el nivel de serviciabilidad del pavimento en el tiempo, tal como se observa en la Figura 7.

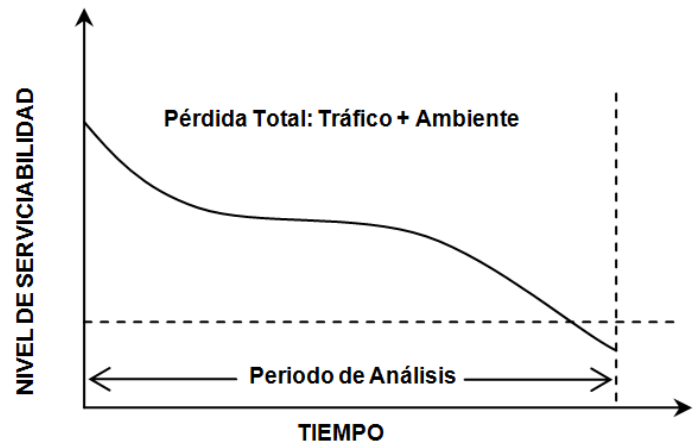
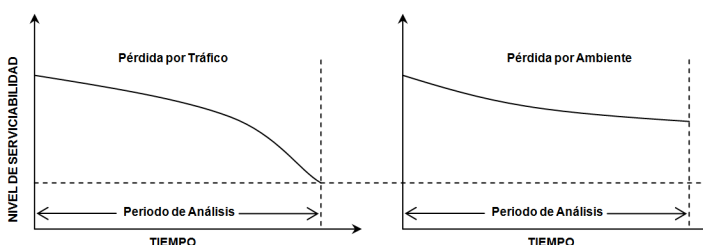


Figura 7. Efecto conjunto tráfico y medioambiente sobre la serviciabilidad de un pavimento Fuente: De Solminihaç, 2001

3. Deterioros por fisuración en pavimentos asfálticos

Numerosos investigadores señalan que el fallo por fisuración en los pavimentos bituminosos es un fenómeno sumamente complejo, difícil de representar por medios experimentales y que está regido por una amplia gama de factores, dentro de los cuales se puede considerar las características de los materiales constituyentes, el espesor de la capa y el proceso de ejecución de la mezcla. Por otra parte, tal como se señaló en el punto anterior, existe la importante influencia de los agentes externos que solicitan el pavimento, que tienen que ver principalmente con las características de las cargas aplicadas y condiciones climáticas imperantes en el medioambiente (Brown et al., 2001; Roberts et al., 1996; McGennis et al., 1994).

Los agentes solicitantes que interaccionan con los pavimentos dan lugar a una serie de fallos o tipos de fallos por fisuración. El catálogo de fallos desarrollado en el programa Strategic Highway Research Program (SHRP) para su utilización en el Long-Term Pavement Performance Program (LTPP), reconoce los tipos de fisuración tal cual se indican en la Tabla 1.

Fisuración en pavimentos asfálticos)
Fisuración por Fatiga Fisuración en Bloque Fisuración de Borde Fisuración Longitudinal Fisuración por Reflexión en Juntas Fisuración Transversala

Tabla 1. Tipos de fallos por fisuración en pavimentos asfálticos Fuente: FHWA, 2003

3.1 Fisuración por fatiga

Este tipo de fallo, también conocido como “piel de cocodrilo”, ocurre generalmente en áreas del pavimento sujeta al impacto de numerosas y repetidas cargas por tráfico, principalmente en la zona de rodadura de la calzada, en la cual la mezcla asfáltica sufre un fatigamiento, o pérdida paulatina de sus propiedades estructurales, producto de las cargas reiteradas. Generalmente este tipo de fallo se caracteriza por tener un patrón geométrico descrito por numerosas grietas interconectadas entre sí, formando trozos de ángulos agudos.

La fisuración por fatiga se puede presentar en diferentes niveles de severidad, Figura 8.

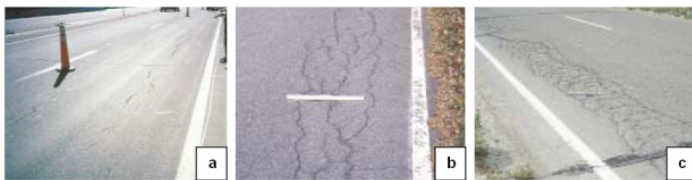


Fig. 2-7 Deterioro por Fatiga en diferentes niveles de severidad. (a). Bajo, (b). Moderado, (c) Alto (Fuente: FHWA, 2003)

Figura 8. Deterioro por fatiga en diferentes niveles de severidad - (a), Bajo, (b), Moderado, (c) Alto Fuente: FHWA, 2003

Corresponde a un nivel de severidad bajo cuando las fisuras están apenas interconectadas entre sí, y no existe expulsión de finos desde las capas inferiores. El nivel de severidad moderado se presenta con un mayor número de grietas interconectadas y sin presencia de expulsión de finos desde las capas inferiores. Finalmente, el alto grado de severidad se puede observar cuando las grietas están completamente interconectadas, presentando expulsión de finos desde las capas inferiores, y además existen trozos de pavimento desprendidos que se mueven con el paso del tránsito.

Dentro de los deterioros de fisuración por fatiga se pueden identificar dos mecanismos. El primero, en que la fisura progresa desde la capa de base, se conoce como fisura ascendente (bottom-up cracking), o también, fisuración “clásica” por fatiga. Este fallo se produce por tensiones y deformaciones producto de esfuerzos de tracción en la base de la capa asfáltica, que provoca que la fisura se inicie y se propague hacia la superficie. En el segundo mecanismo, las fisuras se inician y se propagan desde la superficie del pavimento hacia la base y es conocida como fisuración por fatiga descendente (top-down fatigue cracking). Este fallo ocurre generalmente en pavimentos de mayor espesor, a causa de tensiones combinadas de tracción y corte en la superficie del pavimento bituminoso, en la interfase neumático – pavimento, producto del tránsito de vehículos pesados con neumáticos con altas presiones

de inflado, sumado también el efecto del envejecimiento de la mezcla asfáltica y el efecto térmico que provoca retracciones en el pavimento cuando las temperaturas bajan.

3.2 Fisuración en bloque

Este tipo de fisuración se caracteriza por presentar fisuras o grietas que conforman una serie de trozos aproximadamente rectangulares, cuyas dimensiones pueden estar comprendidas entre 0,1 y 10 m², Figura 9.



Figura 9. Fisuración en bloque

Fuente: Pavement Interactive, Asphalt Pavement Guide

Este tipo de fallo es causado principalmente por las tensiones generadas por diferenciales térmicos, especialmente en mezclas asfálticas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales que dan origen a este tipo de fallo. Otras causas posibles se atribuyen a la falta de espesor o fatiga de las capas del firme, falta de capacidad de soporte de la estructura de pavimento, o bien, a una mala ejecución de las capas que componen el pavimento.

3.3 Fisuración de borde

Este tipo de fisuración se caracteriza por presentar grietas en forma de media luna y se encuentran ubicadas a una distancia no mayor de 0,6 m del borde de la calzada, Figura 10.



Figura 10. Fisuración de borde
Fuente: Dirección de Vialidad-Chile, 2003

Este fallo se produce en los bordes de las capas asfálticas del pavimento que no cuenta con bermas pavimentadas.

Su causa se atribuye a una base granular débil por falta de compactación y confinamiento. Otro factor que acelera este tipo de deterioro es la posible infiltración de humedad, por drenaje insuficiente, que provoca una baja en la estabilidad de las bases de la estructura del pavimento.

3.4 Fisuración longitudinal

Este tipo de fallo se caracteriza por la aparición de grietas predominantemente paralelas al eje del camino, Figura 11.

Cuando la posición de la grieta se encuentra a lo largo del eje de la calzada se atribuye su causa a una mala ejecución de la junta de construcción longitudinal en el extendido de la mezcla asfáltica. Cuando la grieta aparece localizada en la zona de la huella de paso de los vehículos, su causa se atribuye a problemas en las capas inferiores, capas de base y subbase granular, o bien, a un fallo por fatiga de la mezcla. Finalmente cuando las grietas se localizan en otras posiciones su origen se le atribuye a contracciones térmicas producidas en el pavimento cuando existen descensos de temperatura.

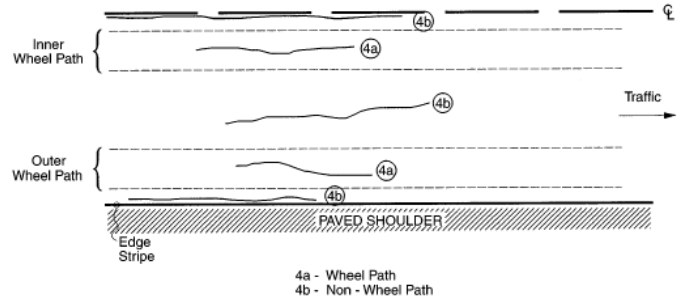


Figura 11. Tipos de fisuración longitudinal
Fuente: FHWA, 2003

Este tipo de fisuración se puede presentar como fisuración ascendente (bottom-up cracking), cuando la causa es principalmente por debilitamiento de las capas inferiores o es un comienzo de fallo por fatiga, o también se puede presentar como fisuración descendente (top-down cracking), cuando el fallo obedece a causas de origen término, o bien, por el paso de vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado, generando tensiones de tracción superficial, tal cual se observa en la Figura 12.



Figura 12. Fisuración longitudinal descendente- top down cracking
Fuente: Harmelink and Aschenbrener, 2003

3.5 Fisuración por reflexión en juntas

Este tipo de fisuración se caracteriza por la aparición de grietas que se producen en las capas asfálticas que refuerzan un pavimento de hormigón, coincidiendo con las juntas y grietas de éste. Estas fisuras progresan a medida que trabajan o se mueven las juntas del pavimento de hormigón ubicado en la capa inferior, reflejándose así la fisura en la superficie. También este tipo de fallo se produce en recapados asfálticos sobre antiguas estructuras de pavimentos con fisuras existentes, las cuales se reflejan en la nueva capa de mezcla hacia la superficie, Figura 13.



Figura 13. Fisuración por reflexión de juntas
Fuente: Pavement Interactive, Asphalt Pavement Guide

3.6 Fisuración transversal

Este tipo de fallo se caracteriza por presentar fisuras aproximadamente normales al eje del camino y se producen sin existir un pavimento de hormigón subyacente, Figura 14. La principal causa atribuida a este tipo de deterioro es el efecto térmico en pavimentos flexibles con mezclas asfálticas de alta rigidez, en el cual se generan tensiones de tracción en la superficie del pavimento cuando las temperaturas bajan. Otra causa probable es la reflexión de las fisuras existentes en las capas bituminosas inferiores del pavimento, producto de una mala ejecución en su junta de construcción transversal, o bien, por reflexión de las fisuras en capas de base tratadas con cemento.



Figura 14. Fisuración transversal
Fuente: FHWA, 2003

4. Mecanismos de fisuración

La formación de fisuras en las mezclas asfálticas reconoce tres etapas. La primera etapa es llamada iniciación, donde se producen los primeros cambios microestructurales producto de las solicitaciones a las que está sometido el material dando lugar a la formación de microfisuras, Figura 15(a). Luego sigue la etapa de propagación, donde se generan las macrofisuras producto de la unión de las microfisuras existentes. Esta unión de microfisuras se debe a que se generan mecanismos de trabazón en la matriz de áridos, Figura 15(b), los cuales junto con las discontinuidades propias del material, como son las dislocaciones existentes, los poros y huecos presentes, se producen puentes de fisuración aumentando la longitud de la fisura, Figura 15 (c- f), hasta terminar finalmente con la fractura o fallo total del material, que es cuando se han separado íntegramente las dos caras de material solicitado.

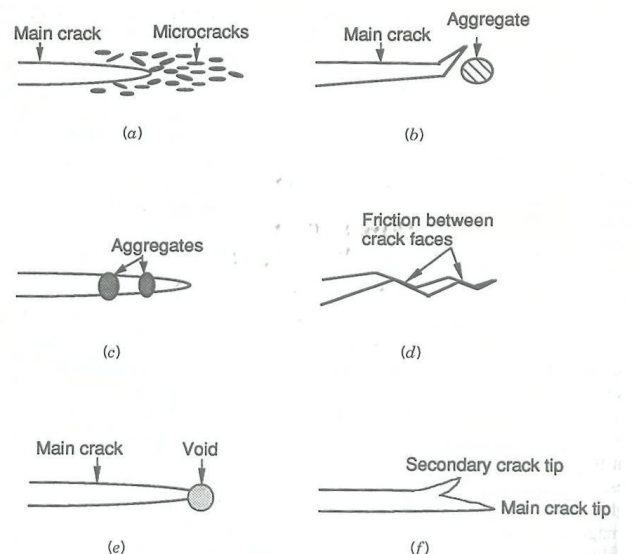


Figura 15. Mecanismos desarrollados durante el proceso de fisuración
Fuente: Shah et al., 1995

Una forma de clasificación de las formas de fisuración de un material fue la introducida por Irwin en 1957, que permite estudiar la concentración de tensiones en la cabeza de una fisura y mostrar sus modos de propagación, definiendo 3 modos: Modo I o modo de apertura (tracción normal), en el cual las caras de la fisura se separan casi paralelamente entre sí, Modo II o modo de corte (corte normal), en el cual las caras de la fisura se deslizan una sobre la otra y Modo III o modo de rasgado (corte paralelo), en el cual las caras de una fisura se deslizan lateralmente una respecto a la otra, Figura 16.

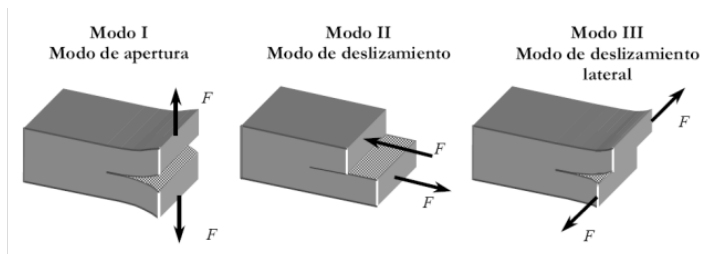


Figura 16. Tres modos fundamentales de propagación de fisuras
Fuente: Oller, 2001

De acuerdo a lo señalado por Braham et al. el año 2007, de los modos de fisuración antes descritos, es el modo I el que más representa el deterioro producido en el pavimento, el cual es observado generalmente cuando una rueda cargada pasa sobre una fisura transversal o longitudinal, cuando se producen esfuerzos térmicos en la superficie de la capa de rodadura, o bien, cuando se producen movimientos de contracción térmica en capas rígidas ubicadas bajo una capa de mezcla bituminosa.

5. Actuales procedimientos para evaluar la fisuración en mezclas asfálticas.

En la literatura se han identificado cuatro ensayos cuya finalidad es medir propiedades mecánicas relacionadas con la fisuración de las mezclas asfálticas. El ensayo de viga entallada, SE(B), se ha utilizado en varios estudios para determinar las propiedades de fractura de las mezclas asfálticas. La geometría del ensayo SE(B), que se muestra en la Figura 17, proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo al modo I de fractura. Sin embargo, de acuerdo a lo señalado por Wagoner et al. en el año 2005, su geometría tiene la desventaja de que al no ser una probeta estandarizada, se limita su aplicabilidad a vigas compactadas en laboratorio, no permitiendo su aplicación a testigos.

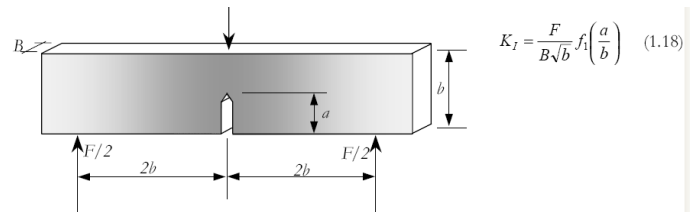


Figura 17. Esquema del ensayo SE(B)
Fuente: Portillo y Cobon, 2008

El ensayo de viga semicircular a flexión, SCB, ha sido aplicado en varios estudios, destacando entre las ventajas de éste ensayo (SCB), su fácil aplicación a probetas y testigos, y que requiere un menor número de muestras por su geometría, Figura 18. Sin embargo, la forma de aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta en el proceso de propagación de la fisura, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura (Wagoner, 2005).

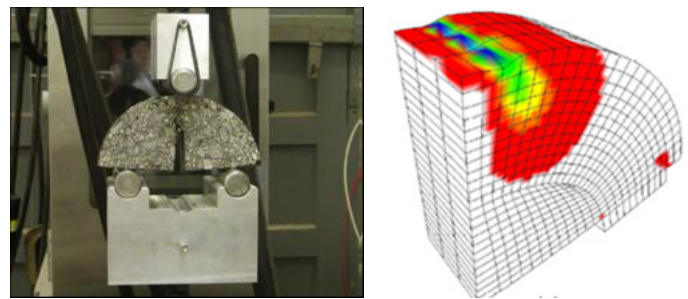


Figura 18. Montaje del ensayo SCB y daño en zona de aplicación de carga
Fuente: Huang et al., 2004 y Molenaar et al., 2002

El ensayo de disco compacto a tracción, DC(T), tiene las ventajas de presentar un tamaño mayor del área de fractura y que posibilita su aplicación a testigos, Figura 19. Sin embargo, en el proceso de fabricación de las probetas existe el inconveniente de generar microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga. Sumado a lo anterior, existe la complejidad de efectuar el ensayo a temperaturas superiores a los 10 °C. (Pérez et al., 2009)

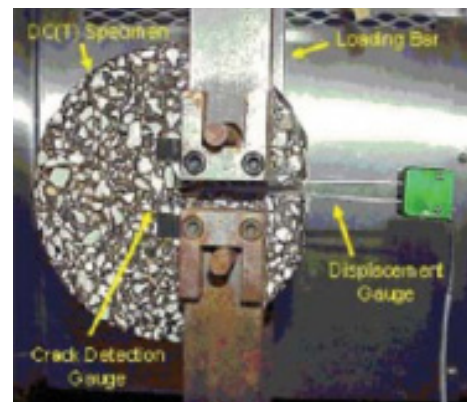


Figura 19. Montaje ensayo DC(T)
Fuente: Kim et al., 2009

El ensayo DBDT que se muestra en la Figura 20 fue desarrollado recientemente por la Universidad de Florida, posee las ventajas de tener un plano de falla conocido y que su geometría permite que las muestras se puedan fabricar de probetas cilíndricas o testigos. La metodología de fabricación de las probetas y los complejos equipos requeridos dificultan una aplicación práctica de este ensayo.

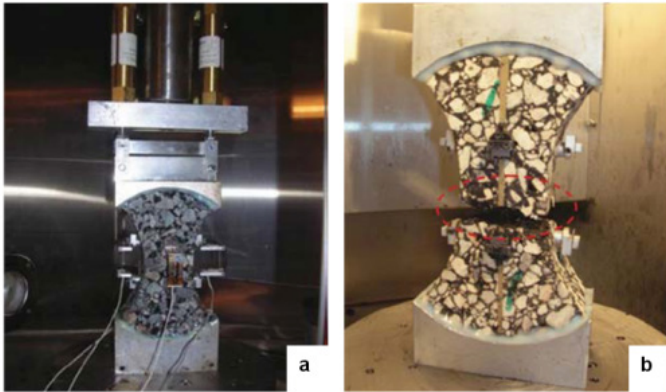


Figura 20. Montaje del ensayo DBDT (a) y la probeta una vez realizado el ensayo (b)
Fuente: Koh et al., 2009

6. Nuevo procedimiento desarrollado para evaluar la fisuración en mezclas asfálticas

En el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (España) se ha desarrollado un nuevo ensayo experimental práctico, cuya finalidad en su desarrollo fue solventar las desventajas presentes en los procedimientos definidos en el punto anterior. Este procedimiento permite evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas a través del cálculo de la energía disipada en el proceso de fisuración de las mezclas, a través de un procedimiento que simula el principal modo de fisuración en pavimentos, el Modo I. Este ensayo ha sido llamado Fénix de acuerdo al proyecto de investigación que ha permitido su desarrollo (Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, Acrónimo: FÉNIX). Un esquema de su montaje, junto con la curva resultante se observa en la Figura 21.

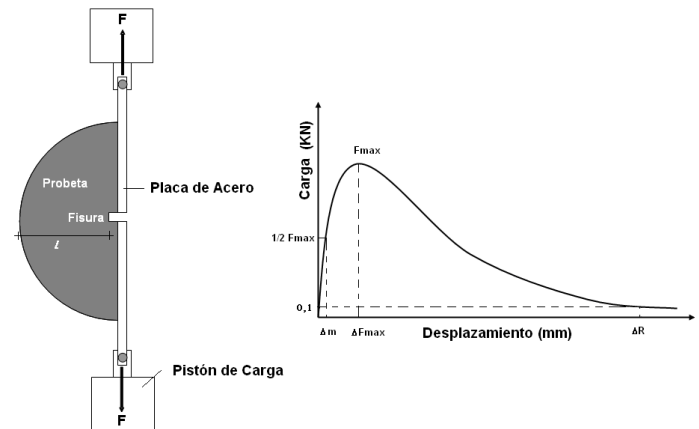


Figura 21: Montaje ensayo Fénix, curva carga-desplazamiento.
Fuente: Valdés et al., 2009

El ensayo Fénix permite obtener la energía disipada en el proceso de fisuración del material, la cual es una combinación de energías liberadas durante el proceso de deformación y fractura del material. La evaluación de la energía disipada en ensayo se presenta como una forma efectiva de medir la resistencia a la fisuración en las mezclas asfálticas. A su vez, el ensayo Fénix presenta la particularidad de desarrollar principalmente tensiones de tracción en los alrededores de la fisura, focalizando el trabajo realizado en propagar la fisura a través del plano previamente inducido, tal cual se muestra en la Figura 22.

La sensibilidad de este ensayo frente a las temperaturas de ejecución se puede observar en la Figura 23. En esta figura se puede observar que a bajas temperaturas, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la fisura se produce en toda la matriz árido – ligante, dejando áridos fracturados a medida que progresa la fisura. A temperaturas intermedias, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa que la fisura se produce mayoritariamente en la interfase árido – ligante, fracturando sólo algunos áridos a medida que ésta se propaga. Finalmente, a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa que la fisura se produce prácticamente sólo en la interfase árido- ligante.

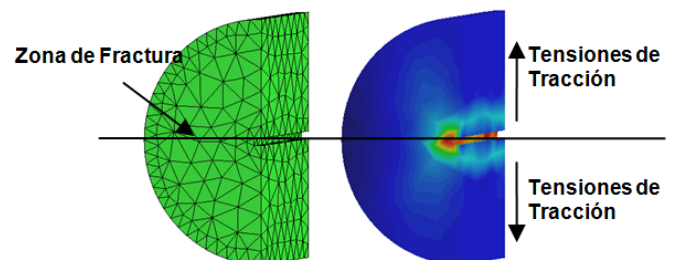


Figura 22: Tensiones de tracción ensayo Fénix.
Fuente: Pérez et al., 2010.

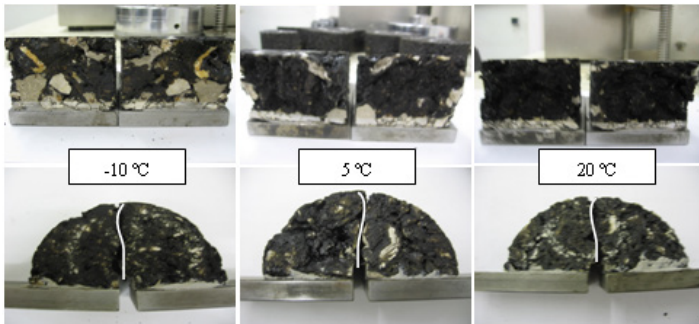


Figura 23. Superficies de fractura a distintas temperaturas en probetas Fénix (Valdés et al., 2009)

Por otra parte, los resultados de la aplicación del procedimiento del ensayo Fénix a mezclas de igual composición granulométrica, pero fabricadas con ligantes de diferente penetración se observan en la Figura 24.

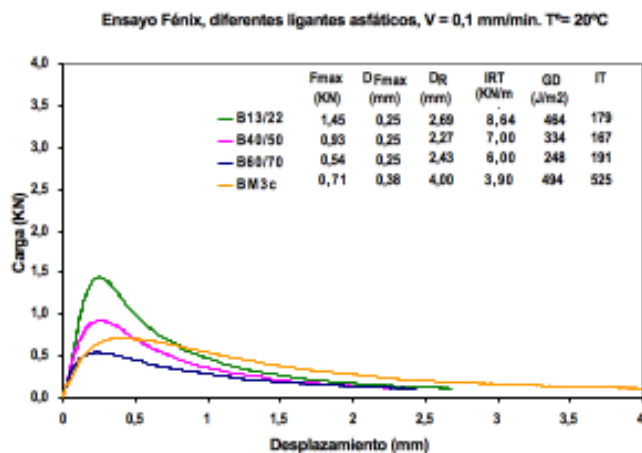


Figura 24. Resultados de parámetros Fénix en distintos ligantes asfálticos. (Valdés et al., 2009)

5. Conclusiones

En este artículo se presenta la importancia que tienen las infraestructuras de transportes en el desarrollo económico de un país, y a raíz de ello, la necesidad poder contar con infraestructuras que no presenten deterioros. En este contexto, en este trabajo se describe la influencia y los mecanismos de uno de los principales deterioros frecuentes en nuestras carreteras, la fisuración de las capas asfálticas. Por ello, se realizó un análisis descriptivo de los procedimientos actuales que tratan de simular los mecanismos de fisuración a través de ensayos experimentales, señalando las ventajas y desventajas de éstos. Finalmente se muestran los principales resultados experimentales de un nuevo procedimiento diseñado que permite caracterizar y diseñar mezclas asfálticas con una mayor resistencia a la fisuración, llamado ensayo Fénix. El ensayo Fénix posee metodología experimental que es de fácil aplicación y ha demostrado ser un procedimiento sensible y repetible, con el que se han evaluado diferentes temperaturas de ensayo y tipos de mezclas asfálticas.

6. Referencias

- A. Braham, Peterson C., Buttlar W. 2009. Mixed-mode cracking in asphalt concrete, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vol.2, pp. 785-793.
- Brown R., Kandhal P., Zhang J. 2001. Performance Testing for Hot Mix Asphalt. NCAT Report 01-05, National Center for Asphalt Technology.
- De Solminihaç, H. 2001. Gestión de Infraestructura Vial. 2ª edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- European Asphalt Pavement Association, *Asphalt in Figures*, 2007.
- Dirección de Vialidad – Ministerio de Obras Públicas. 2003. Manual de Carreteras, Volumen 7 (Mantenimiento Vial), Chile.
- Federal Highway Administration. 2003. Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program, Publication Nº FHWA-RD-03-031, USA.
- Harmelink D., Aschenbrenner T. 2003. Extent of top-down cracking in Colorado, Report No. CDOT-DTD-R-2003-7, Colorado Department of Transportation.
- Huang B., Brian E., William R., Zhang Z., Zuo G. 2004. Laboratory Study of Fatigue Characteristics of HMA Surface Mixtures Containing RAP, In Transportation Research Board, TRB Annual Meeting. CD-ROM, Washington, D.C., USA.
- Ibarrola H. 2008. La Importancia de la Infraestructura Carretera en el Desarrollo Económico de un País. *Rutas*, Nº 127, pp. 2-3.
- Keane T. 1996. The Economic Importance of the National Highway System. *Public Road*, Vol. 59, Nº 4.
- Kim H., Partl M., Wagoner M., Buttlar W. 2009. Size effect investigation on fracturing of asphalt concrete using the cohesive softening Discrete Element Model, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vol.2, pp. 827-836.
- Koh C., Lopp G., Roque R. 2009. Development of a Dog-Bone Direct Tension Test (DBDT) for asphalt concrete. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vol.1, pp. 585-596.
- Kuai, H., Lee H., Zi G. 2009. Application of Generalized J Integral to Crack Propagation Modeling. In Transportation Research Board, 88th Annual Meeting. CD-ROM, Washington, D.C., USA.
- Martínez F. 2006. Deterioro en Capas Asfálticas: Fisuración, Jornadas Técnicas de Actualización y Capacitación en el Área de los Pavimentos Flexibles, Argentina.
- McGennis R., Anderson R., Kennedy T., Solaimanian M. 1994. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Publication No. FHWA-SA-95-003.
- Molenaar A., Scarpas A., Liu X., Erkens S. 2002. Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful?. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp. 795-815.
- Oller S. *Fractura Mecánica*. 2001. Un Enfoque Global, Centro Internacional de Métodos Numéricos, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Pérez F., Valdés G., Miró R., Martínez A., Botella R. 2010. Fénix Test: development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures, In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, in press, Transportation Research Board of the National Academies, ISSN 0361-1981, Vol 2181/2010, pp 36-43.
- Portillo O., Cebon D. 2008. Fracture of Bitumen and Bituminous Mixes, Oatley Seminar, Cambridge University Engineering Department.
- Roberts F., Kandhal P., Ray E., Lee D., Kennedy T. 1996. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA Education Foundation, Second Edition.
- Shah S., Shwartz S., Ouyang Ch. 1995. *Fracture Mechanics of Concrete, Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*, Wiley-Interscience Publication, New York, USA.
- Tamames R. 2003. Una Visión Global desde La Economía Ecológica: Desarrollo Sostenido y Desarrollo Sostenible, La Nueva Cultura de Las Carreteras. Asociación Española de la Carretera. pp. 13-33.
- Valdés G., Pérez F. y Botella R. 2009. Ensayo Fénix, una nueva metodología para medir la resistencia la fisuración en mezclas asfálticas, *Revista de la Construcción*, ISSN 0717-7925, Nº 14, pp. 114-125.
- Wagoner M., Buttlar W., Paulino G. 2005. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, *Experimental Mechanics*, Vol. 45, Nº 3, pp 270-277.



¿Qué es el hormigón arquitectónico? What's architectonic concrete?

Lira Cifuentes G.1

1 Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile.
glira@ufro.cl, phone: 56-45-325685

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
08-07-2011

Aceptado
29-08-2011

Publicado
01-01-2012

Palabras Claves:
Hormigón
arquitectónico
Proceso
constructivo

ARTICLE INFO

Article history:

Received
08-07-2011

Accepted
29-08-2011

Available
01-01-2012

Keywords:
Architectonic
concrete
Construct process

RESUMEN

En los últimos años, el denominado "HORMIGÓN ARQUITECTÓNICO" se ha vuelto protagonista dentro de los procesos constructivos relacionados con el hormigón armado como material de expresión arquitectónica. Sin embargo, como se trata de un concepto relativamente nuevo, existe desconocimiento y confusión, entre los profesionales del área, sobre lo que implica realmente este proceso. Consecuentemente, esto se manifiesta en incertidumbre al momento de ejecutar una obra, con la insatisfacción de las expectativas para el proyectista y mandante.

Dado este contexto, la contribución de esta investigación es contribuir a aclarar sobre la apropiada implementación del hormigón arquitectónico. Las obras de hormigón requieren del conocimiento de las características del material, por parte de los constructores y proyectistas (Constructividad, Stewart Adams, 1990). Esto toma mayor fuerza en aquellas que se han definido con expresión en hormigón arquitectónico. Este trabajo ayuda a difundir este proceso en el contexto del denominado "arte de la buena construcción". Más aún, si este artículo se encuentra respaldado por la experiencia arquitectónica del autor, particularmente en el diseño, administración de los contratos, y control durante la ejecución de las obras, como también con su experiencia de usuario en edificios de tales características.

Abstract

In the last time, the so called architectonic concrete has become a protagonist among the construction processes related to reinforced concrete as materiality of architectural expression. However, since this concept is relatively new there is disregard and confusion, particularly among specialist in this field, about which are the implications of this process. Consequently, there is a significant uncertainty at the moment of execute a construction project, leading unfulfilled expectations both for the designer and the owner.

Given this context, the contribution of this piece of research is shed light on the appropriated implementation of architectonic concrete. The building of concrete requires the knowledge of the characteristic of materials by both constructor and designer (Constructiveness, Stewart Adams, 1990). This is more important in those buildings with expression in architectonic concrete. This study aims to contribute in the diffusion of this process within the so called "the art of the good construction". Importantly, this article is backed by the architectonic experience of the author, particularly in the design, administration of contract, and control during the execution of building's projects as well as his experience as user in buildings with such characteristics.

1. ¿Que es el hormigón arquitectónico?

A lo señalado en el resumen cabe agregar, que en los años de experiencia de docencia universitaria del autor, se ha detectado un mayor grado de desconocimiento en el uso de esta tecnología asociada a los aspectos constructivos y de proyecto, especialmente en los alumnos de Arquitectura e Ingeniería en Construcción. En Chile por otra parte, no existe un número importante de literatura asociada y pertinente en este tema, donde en lo principal, los textos de consulta son extranjeros, con términos y tecnologías diferentes a las que se emplean generalmente en nuestro país.



Fig. 1.- Edificio Facultad de Medicina de la Universidad de La Frontera, Temuco, seleccionado en la muestra de la XIV Bienal de Arquitectura, 2004, arquitectos: Andrés Abarzúa Gómez y Guillermo Lira Cifuentes. Empresa Constructora: Wörner S.A.



Fig. 2.- Building in the Faculty of Medicine of the Universidad de La Frontera (UFRO), Temuco, selected by the XIV Biennial of Architecture 2004, Chile. Architects: Andrés Abarzúa Gómez and Guillermo Lira Cifuentes; Construction Company: Wörner S.A. (Architectonic Concrete)

2. Origen

El origen del hormigón expuesto a “a la vista”, surge de la corriente denominada “Brutalismo” a principios del siglo XX, con el advenimiento y utilización en forma masiva, de los nuevos materiales tales como el acero y el hormigón armado en la construcción.

Dicha tendencia señalaba que los materiales deberían expresarse en la obra arquitectónica, tal como “trabajan” y se encuentran en la naturaleza, en especial a la vista, sin recubrimientos ni adornos que los oculten. Esto también como una reacción al Neoclasicismo aún imperante en la época.

Tal es así que dichas obras aprovechaban las texturas que dejaban en los muros y elementos estructurales las huellas del moldaje tradicional de madera.



Fig. 3.- Unidad de Habitación, Marsella, Francia, 1952 (Hormigón a la Vista).



Fig. 4.- Ex. edificio de los Tribunales en Calle Prat en Temuco, (Hormigón a la vista).

Con el avance de la tecnología del hormigón ya sobre la segunda mitad del siglo XX, surgen los encofrados industrializados, la compactación mecánica, aditivos superplastificantes, hormigones de alta resistencia, etc. que permiten dar un salto trascendente en la calidad de los procesos constructivos. Esto deja el camino abierto para nuevas formas de expresión del material, ya no como una “obra gruesa” o un edificio sin acabado, si no que ahora es posible dar al hormigón una calidad de terminación óptima. A dichos avances tecnológicos se suman nuevas tendencias en el diseño tales como el Minimalismo, que explota con éxito estas nuevas expresiones, que no requieren de adornos ni revestimientos.

En estas nuevas tendencias, se cuida el acabado de los muros y se aprovechan los elementos que permiten su construcción para entregar lisura, ritmos, líneas de canterías, etc., que determinan una expresión completamente nueva y lograda del material, ahora con calidad de terminación.

3. Definición

Para definir el hormigón arquitectónico, cabe señalar que este requiere de una superficie virgen, donde la obra gruesa tiene calidad de terminación, sin que sea necesario aplicar ningún tratamiento posterior al desencofrado.

“El hormigón arquitectónico corresponde a una edificación de hormigón armado, el cual está expuesto a la vista como superficie en la estructura terminada y contribuye en forma determinante a su aspecto visual, situación que se encuentra claramente indicada en las especificaciones técnicas y contrato de la obra”.

Un criterio de aceptación de un elemento de hormigón arquitectónico logrado, sería aquel que presenta un aspecto agradable con una variación mínima de color y textura, sin defectos superficiales, cuando es visto a una distancia de 6mts.

4. Planificación & Diseño

Quizás más que en ningún otro proceso constructivo, el desarrollo de una obra expresada como hormigón arquitectónico, requiere de una fase de planeamiento tan rigurosa como en este caso. Ello porque teniendo como norte el resultado final esperado, el arquitecto debe en primer lugar fijar las estrategias de su diseño, en función del proceso constructivo ya definido. Esto involucra un conocimiento riguroso del encofrado o moldaje a utilizar, sus características, propiedades, limitaciones, etc. En base a este conocimiento deberá establecer su diseño basado en los módulos definidos por el fabricante y modelo del mismo.

En esta etapa el arquitecto deberá además del aspecto constructivo, incorporar los criterios del diseño estructural, para que en conjunto con el ingeniero calculista y el ingeniero constructor, concuerden los aspectos relevantes de cada área y como estas intervienen en la obra arquitectónica.



Fig. 5 Edificio Spa Balthus, Santiago (Hormigón Arquitectónico). Obsérvese la lisura del muro curvo y las líneas de canterías que dan ritmo y unidad a la fachada del edificio.



Fig. 6 Edificio Museo Interactivo El Mirador, Santiago, (Hormigón Arquitectónico).

Punto aparte merecen los aspectos administrativos-técnicos de la materialización de la obra, especificaciones técnicas, bases de la licitación y posteriormente contrato de obra. En todos ellos deberá quedar plasmado en forma clara la intención del proyecto, la forma como se logrará y las multas si dicho fin no se cumple. De esta forma los contratistas desde el momento de participar en la licitación, sabrán las características especiales de la obra y la importancia de seguir los protocolos establecidos para ello. Lo anterior para no asumir desconocimiento y evaluar el proceso constructivo en todos sus aspectos, con el fin de lograr la calidad especificada por el proyectista y esperada por el mandante.

Cabe mencionar múltiples ejemplos de obras concebidas como hormigón arquitectónico las que finalmente no lograron dicho objetivo, debiendo “maquillarse” ya sea con pintura o revoque de hormigón para disimular los defectos o bien quedar como “hormigón a la vista”, con la consecuente molestia del arquitecto y mandante.

5. Moldajes

En cuanto al proceso constructivo, el más relevante sin lugar a dudas para lograr el objetivo propuesto, es el encofrado o moldaje, ya que de este elemento depende en gran medida el resultado de lisura y de color homogéneo esperado, esto ya que se está buscando obtener una superficie con calidad de terminación. En este sentido es un error pensar en utilizar cualquier tipo de encofrado y dejar así que el contratista resuelva los problemas que se van a presentar durante la construcción.

En primer lugar el arquitecto deberá diseñar su obra en atención a la disponibilidad de la modulación de placas del moldaje elegido, con este antecedente deberá definir para las fachadas, la ubicación de los vanos y en acuerdo a ellos las canterías.



Fig. 7 Edificio Liceo Camilo Henríquez, Temuco
(intención de Hormigón Arquitectónico no lograda).

En la fachada del edificio del Liceo Camilo Henríquez, (Fig. 7.- fotografía anterior) se observan deficiencias en la modulación de las placas del moldaje (no existe continuidad de líneas en las uniones de las placas ni estas con los marcos de las ventanas).

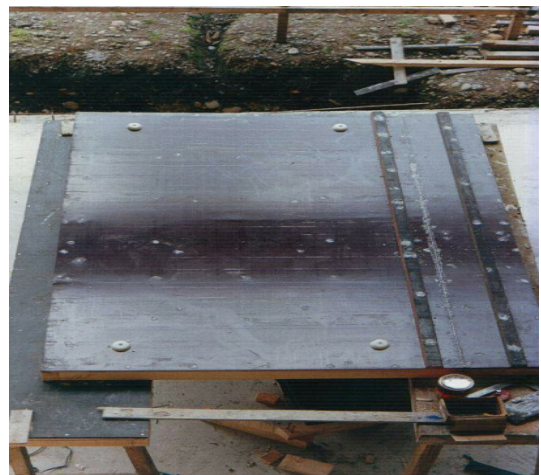


Fig. 8 Placa de moldaje con botones decorativos y canterías



Fig. 9 Moldaje Peri Vario con vigas GT 24 (Fac. Medicina UFRO)

Las canterías permiten dar un ritmo a las fachadas y relacionar estas líneas con otros elementos de la construcción, tales como los marcos de las ventanas. Por otra parte las canterías gracias a su sombra, permitirán ocultar las juntas frías o de trabajo entre las fases de hormigonado y los pasadores de los moldajes (codales). Con esto además se logra dar unidad a las fachadas.

Para ello, primero se debe diseñar la fachada en estricto apego a las dimensiones de las placas del moldaje, vanos y estructura del muro cortina, de manera de crear un ritmo y un aspecto unitario en todo el conjunto aún cuando existiera cambio de materialidad (hormigón-vidrio).

En el edificio de la Facultad de Medicina de la Universidad de La Frontera, se elaboró el plano de elevaciones como un plano constructivo con la modulación de todos los elementos involucrados (canterías, placas, botones decorativos, etc.). El moldaje permite además incorporar los negativos (piezas de contrachapado) y los botones decorativos de acrílico atornillados a la placa.



Fig. 11 Expresión final en el muro terminado exactamente igual a lo indicado en el plano constructivo

Otro aspecto interesante que llevó a definir la placa Peri con la Viga reticulada GT 24, para este edificio, fue la facilidad para formar un paño completo de muro (piso a cielo) en un solo cuerpo de moldaje. Esta condición permitía concretar un muro completo en toda su altura, dejando las juntas de trabajo a nivel de losas, además por su poco peso el moldaje podía ser trasladado con la grúa.

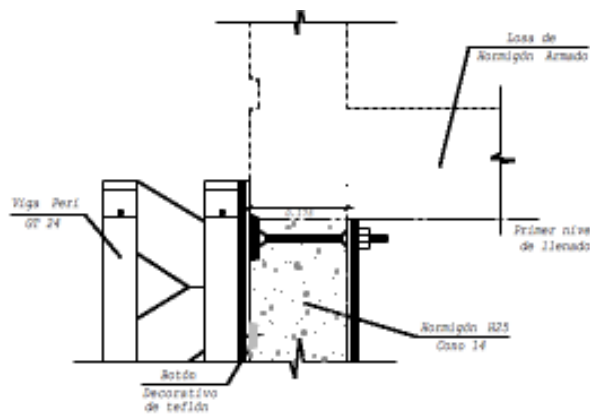


Fig. 12 Paso 01

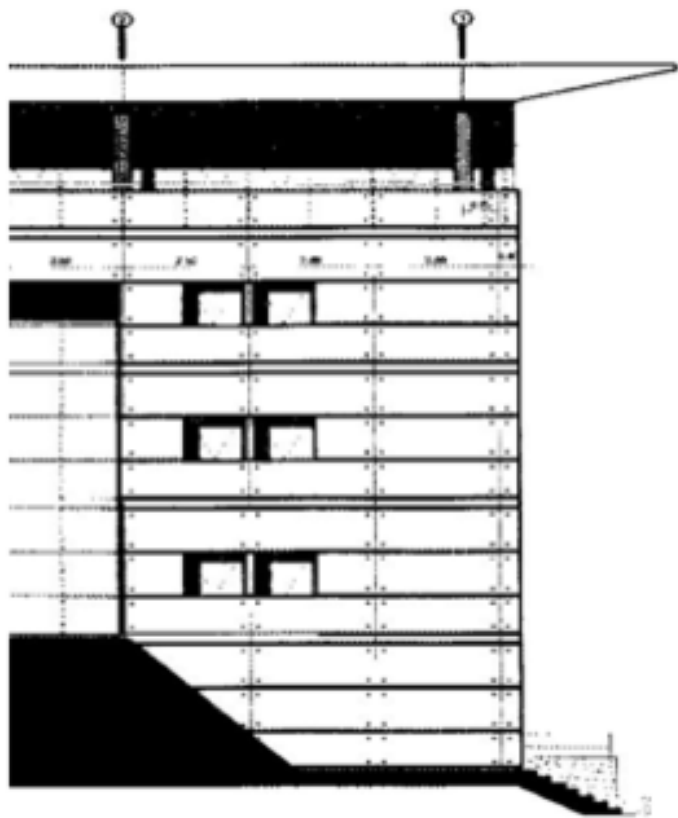


Fig. 10 Plano constructivo, aplicado en el edificio de la Facultad de Medicina de la Universidad de La Frontera, (diseño-proceso).

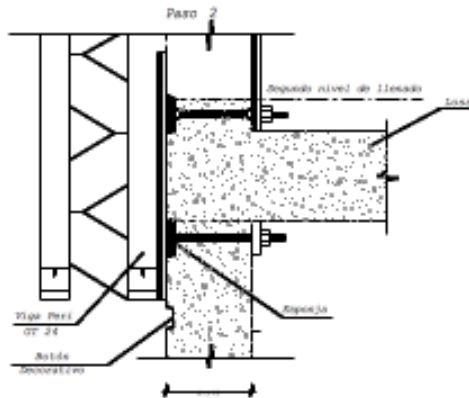


Fig. 13 Paso 02

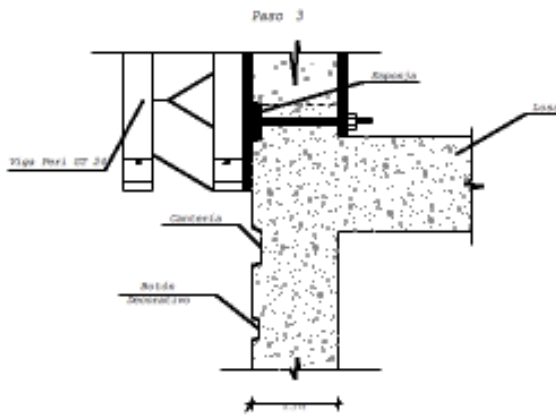


Fig. 14 Paso 03

Tratamiento de junta de construcción en hormigón arquitectónico, marcando con una doble cantería la cabeza de la losa. La cantería permite ocultar la junta de hormigonado y la huella de los pasadores del moldaje (codales)

Fundamental resulta para el hormigón arquitectónico el hormigonado por paños completos evitando al máximo las juntas frías, lo cual se puede observar en los esquemas precedentes. En ellos se explica cómo se concreta el muro hasta la losa, 1era. cantería en el paso 1, luego la losa en el paso 2 y finalmente se sigue con el muro siguiente, 2da. cantería, paso 3.

En todo caso la condición más importante de la lisura, se obtiene mediante la utilización en este tipo de moldaje, de la placa contrachapada con revestimiento fenólico, la cual como superficie de contacto con el hormigón da la garantía de un óptimo resultado. El éxito también debe asociarse al empleo del desmoldante indicado por el fabricante del encofrado.



Fig. 15 Placa de contrachapado con revestimiento fenólico Peri, $e=18\text{mm}$.

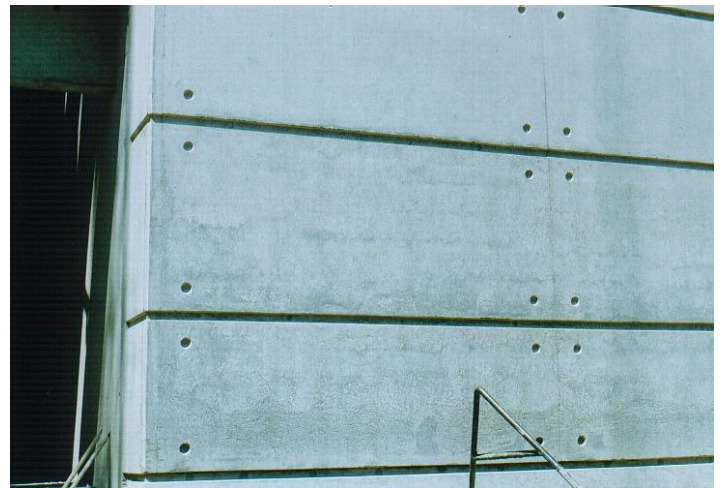


Fig. 16 Muro del edificio (Fac. Medicina) donde se aprecian las canterías y modulación de placas como así también los botones decorativos.

6. El Acero en el Hormigón

Otro aspecto no menor en el hormigón arquitectónico resulta de la adecuada atención en fase de diseño y constructiva de las canterías. Estos elementos en bajo relieve del muro, implican cuidar el distanciamiento de las armaduras exteriores más expuestas y el sistema de uniones de las mismas. Dado que el muro no lleva revestimiento, se debe asegurar la adecuada protección de la armadura a la intemperie por parte del recubrimiento de hormigón, con el distanciamiento mínimo de 3cms al fondo de la cantería. Esto implica tener el cuidado por parte del calculista de indicar correctamente las dimensiones y colocación de los elementos, y del constructor de respetarlos. Por otra parte se debe tener la precaución de amarrar las armaduras con alambre galvanizado, previniendo oxidaciones futuras y manchas en los muros.

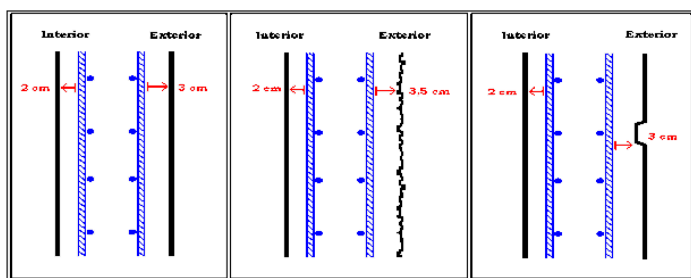


Fig. 17.- Detalle de armaduras en hormigón a la vista con acabado liso, hormigón a la vista puntereadado y hormigón arquitectónico en el último caso

7. Dosificación

Como el sistema constructivo en hormigón requiere que el constructor siga estrictamente la cadena de eventos asociados que permite un buen resultado final, este no es posible de obtener, si no se considera una dosificación adecuada del mismo.

En este caso y para el edificio de la Facultad de Medicina, se aplicó la siguiente dosificación por m³

Hormigón Tipo **H25 (90) 20 – 14 – 11 – 28 – B**

Donde: 90 ☒ Nivel de confianza

20 ☒ Tamaño máximo (mm)

14 ☒ Asentamiento de cono (cm)

11 ☒ Tipo de cemento (Bio Bio Especial)

28 ☒ Resistencia a los 28 días

B ☒ Bombeable

Para 1 m³ de hormigón la dosificación es la siguiente:

Cemento: Bio Bio Especial **385 Kg**

Arena 1: C.G. Gross **855 Kg**

Gravilla: R.P.W. (3/4") **980 Kg**

Aditivo: Plastiment H.E. **1,63 Lt**

Agua: **186 Lt**

El cemento elegido corresponde al indicado, dado que para un hormigón arquitectónico el muro debe ser lo más claro posible para una óptima expresión, situación que en Chile sólo la entrega este tipo de producto.

El asentamiento de cono de Abrams (14), permite una mezcla muy fluida, que asegura el llenado de todos los espacios del moldaje y constituir una superficie lisa. Además se facilita el trabajo para la bomba de hormigón, sistema de colocación adecuado al resultado esperado por la rapidez y calidad involucrada.

8. Colocación & Compactación

La fabricación del hormigón se realiza en planta y se traslada en camión mixer, hasta la obra donde se lleva a los moldajes mediante bomba de hormigonado. El hormigón debe depositarse en capas entre 20-30 cm., de tal forma que tanto las burbujas superficiales como las internas se eliminan completamente.

Existen tres etapas de compactación las que se realizan con vibrador de alta frecuencia, las que son necesarias

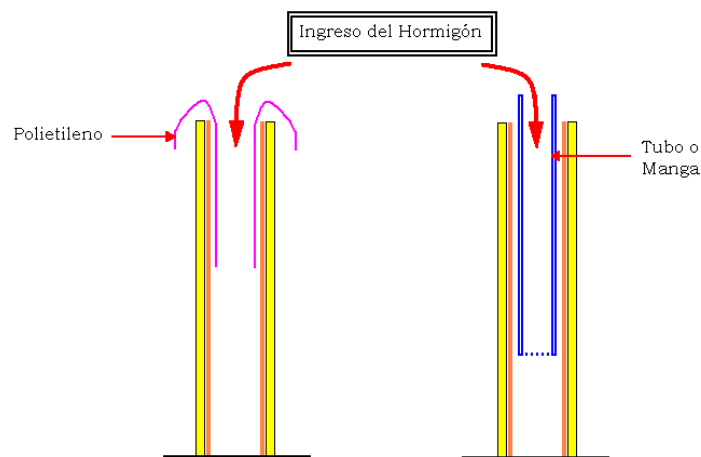


Fig. 18.- Detalle de protección de las paredes internas superiores del moldaje.

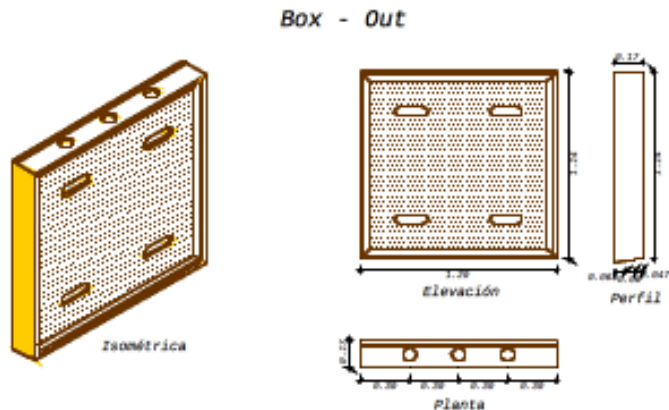


Fig. 19.- Box – Out

para dar la calidad necesaria al acabado. Primero se eliminan los nidos y huecos de mayor tamaño, luego con una agitación adicional ascienden las burbujas a la superficie. La segunda etapa luego de 20 min. donde se vuelve a vibrar para eliminar la mayoría de las burbujas que están en la superficie del moldaje, y por último pasados 5 min. se vibra nuevamente para asegurar que la superficie esté libre de burbujas para dar la calidad necesaria al acabado. Primero se eliminan los nidos y huecos de mayor tamaño, luego con una agitación adicional ascienden las burbujas a la superficie. La segunda etapa luego de 20 min. donde se vuelve a vibrar para eliminar la mayoría de las burbujas que están en la superficie del moldaje, y por último pasados 5 min. se vibra nuevamente para asegurar que la superficie esté libre de burbujas.

special cuidado se debe tener en esta etapa para evitar la segregación por una parte y por otra el “lavado” del desmoldante desde las partes altas del moldaje. Para ello y tal como se muestra en la figura, es recomendable utilizar mangas para depositar el hormigón en las partes bajas y colocar polietileno en la parte superior para facilitar posteriormente el descimbre y que no se salga la superficie del muro, esto dado que el hormigón arquitectónico no acepta reparaciones.

Especial preocupación se debe tener en este proceso, para la conformación de los vanos integrados a los muros, dado que es muy difícil la compactación a nivel de antepechos bajo el alféizar.

En el edificio de la Facultad de Medicina de La Universidad de La Frontera, la empresa constructora resolvió el problema mediante la incorporación de una caja (Box Out) que calzaba exactamente en el vano de la ventana. Esta caja era hueca en su alma, por donde pasaban tres tubos de P.V.C. que servían de ductos para incorporar el hormigón que faltaba en el antepecho. Esto permitía además, realizar el vibrado de éste por los ductos debido a que la botella del vibrador podía pasar por ellos.

El Box Out además en su lado inferior tenía la forma del alféizar con bota-agua incluido y en su parte superior se le colocó medio rodón para imprimir el corta-gotera.

El proceso de vaciado se detalla en las siguientes imágenes:

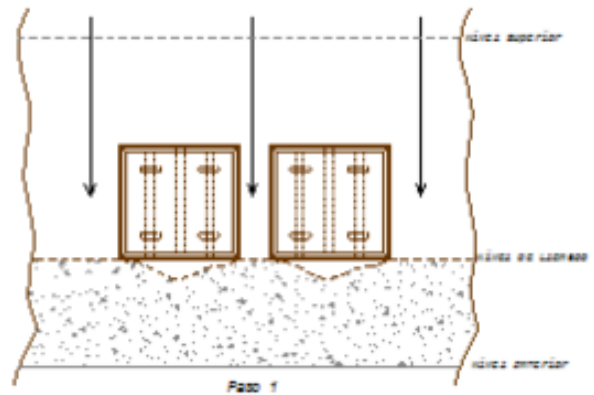


Fig. 20.- Paso 1, vaciado del antepecho hasta el alféizar.

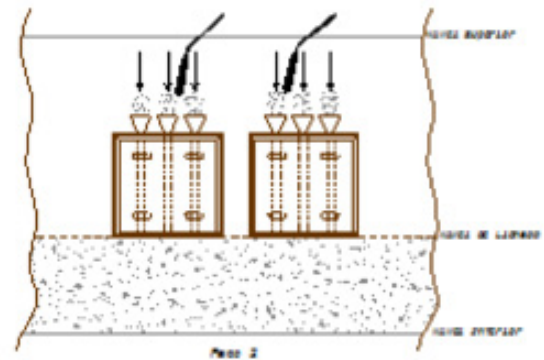


Fig. 21.- Paso 2, se completa el vaciado y compactación del antepecho.

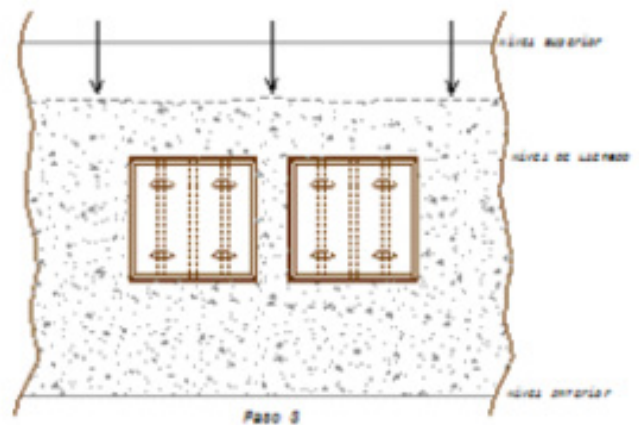


Fig. 22.- Paso 3, vaciado final.

Luego de completado el hormigonado se niveló la superficie con llana y platacho (manual).

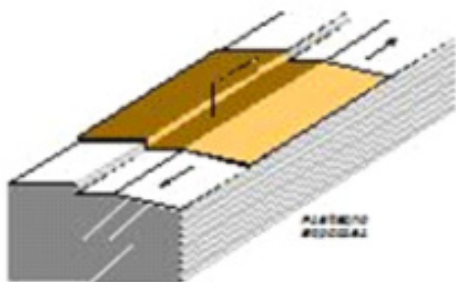


Fig. 23 Platacho especial

La terminación del antepecho en los muros con ventanas en toda su extensión se realizó con un platocho especial Fig 23.-, confeccionado de tal forma que permitía dejar el alféizar listo para recibir los marcos de ventanas, al igual que con el Box – Out, debido a que no se podían hacer reparaciones con mortero en este ni en ningún otro elemento a la vista.



Fig. 24.- Terminación del alféizar

9. Curado y desmolde

El curado además de ser un factor primordial para alcanzar la resistencia especificada sin agrietamientos, es importante para obtener un color homogéneo en la superficie por lo que se deben tomar precauciones adicionales, ya sea en el tiempo de curado como con las condiciones climáticas.

El desmolde se realiza a las 72 hrs para evitar además de los daños en la superficie, los posibles descascaramientos en zonas donde

están adheridas las canterías y botones decorativos. Además se debe programar que el tiempo transcurrido antes del desmolde debe ser igual durante todo el desarrollo de la obra.

10. Cuidados

La impermeabilización de la superficie del hormigón (QHC), es generalmente el único tratamiento posterior a que se recurre para mantenerlo, ya que actúa como barrera de protección contra los elementos contaminantes que se encuentran en la atmósfera.

También la impermeabilización ayuda a evitar que el muro se manche con humedad, la cual además de proteger la superficie de la suciedad y hongos, favorece su apariencia estética ya que impide cambios de color productos de la absorción de agua.



Fig. 25 Muro norte edificio Facultad de Medicina Universidad de La Frontera

11. Conclusiones

Para finalizar, cabe señalar que el “arte de la buena construcción”, debe ser el norte principal en este tipo de procesos constructivos, donde los profesionales del área, tanto arquitectos como ingenieros calculistas e ingenieros constructores, deben trabajar mancomunadamente desde el momento del diseño para lograr el resultado esperado.

Este resultado por otra parte como se puede apreciar, no es fácil de lograr pues a la gran cantidad de pasos que comúnmente conlleva una obra de hormigón, se deben sumar los aquí descritos en forma resumida. A lo anterior se suma el involucramiento de los trabajadores de la empresa constructora, quienes son los que tienen en sus manos la materialización final de la obra.

Por último señalar que este artículo además de responder a la pregunta de su título, pretende difundir y definir en forma más precisa este interesante sistema constructivo, y que sirva de aporte para aquellos profesionales que se interesen en diseñar y construir una obra en expresión de hormigón arquitectónico.

12. Referencias

- 1.- Trabajo de Título: Autor: Felipe Eduardo Vergara Bosman, Prof. Guía: Guillermo Lira Cifuentes, 2005 “Estudio Comparativo Hormigón Arquitectónico y Hormigón a la Vista”, Temuco, Chile, Universidad de La Frontera.
- 2.- Trabajo de Título: Autor: Gonzalo Castro Vera, Prof. Guía: Guillermo Lira Cifuentes, 2003 “Hormigón Arquitectónico”, Temuco, Chile, Universidad de La Frontera
- 3.- Libro: Stewart Adams, 1990, “Constructividad”, Barcelona, España, Ediciones CEAL S.A.
- 4.- Catálogo: Alejandra Canessa V., Magdalena Fuentealba A., 2004, “XIV Bienal de Arquitectura”, Santiago, Chile, Editora Yungleng Sánchez H. (Páginas 194-195)



Fig. 27.- Autor. Escalera edificio Depto. de Ingeniería de Sistemas, Campus Andrés Bello, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. Arquitectos: Andrés Abarzúa Gómez y Guillermo Lira Cifuentes (hormigón arquitectónico)



Diagnóstico preliminar al estado de oportuno pago en la ejecución de proyectos de infraestructura con financiamiento FNDR

Preliminary diagnosis of timely payment to the state in the execution of infrastructure project financed by the FNDR

Sierra L.1, Artigas C.2 & Osses R.3

1,2,3Departamento de Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile

lsierra@ufro.cl, phone: 56-45-325680, fax: 56-45-592812

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
01-08-2011
Aceptado
15-09-2011
Publicado
01-01-2012

Palabras Claves:
Creación de
Asignación
Proyecto de
Arrastre
Estado de Pago
Mandante

ARTICLE INFO

Article history:

Received
01-08-2011
Accepted
15-09-2011
Available
01-01-2012

Keywords:
Assignment
Creating
Drag Project
Pay Status
Owner

RESUMEN

En la actualidad se distinguen variados tipos de fondos de inversión pública, siendo el Fondo Nacional de Desarrollo Regional, denominado FNDR, uno de los de mayor trascendencia y proporcionando la principal fuente de recursos para la ejecución de proyectos en las regiones de Chile. Este fondo es asignado a los gobiernos regionales para la ejecución de proyectos según los lineamientos y prioridades zonales.

La importancia del FNDR, en la región de La Araucanía para el desarrollo de la infraestructura y el reciente cuestionamiento de diversas instituciones y empresas respecto al proceso de pago oportuno de obras de construcción, conduce al propósito de este estudio, el que pretende diagnosticar el estado de oportuno pago de la ejecución de proyectos que cuentan con este financiamiento, en donde el Ministerio de Obras Públicas (MOP), actúa como unidad técnica a través de sus Direcciones de Arquitectura y Vialidad, de tal manera de verificar para este alcance, la magnitud de la existencia de esta problemática y sus posibles causas.

Esta es una investigación exploratoria no experimental, realizada en base a la recolección de información de primera fuente, a través de entrevistas aplicadas a empresas constructoras que han desarrollado proyectos con financiamiento FNDR e instituciones públicas involucradas en los procesos.

Abstract

At present distinguish various types of public investment funds being the Regional Development National Fund, called FNDR, one of the most significant and providing the main source of funds for projects in the regions of Chile. This fund is assigned to regional governments for the implementation of projects according to the guidelines and zonal prioritization.

The importance of FNDR, in the Araucania region for infrastructure development and the recent questioning of various institutions and companies about the process of timely payment of construction works leads to the purpose of this study, which intends to diagnose the state timely payment of the execution of projects with this funding, where the Ministry of Obras Publicas (MOP), acting as technical unit through its Department of Arquitectura y Vialidad, so checking for this scope, the magnitude of the existence of the problem and its possible causes

This is a non-experimental exploratory research, conducted on the basis of gathering first-hand information through interviews applied to construction companies who have developed projects funded FNDR and public institutions involved in the process.



1. Introducción

La política de Inversiones establecida por el Gobierno tiene como principal objetivo mejorar la calidad en la gestión inversionista del sector público. Así, con la asignación de los diversos fondos de inversión a los proyectos socioeconómicos más rentables o necesarios para la población, se contribuye al crecimiento del país.

Es así como el gobierno y entidades privadas han establecido y utilizado diversos canales para financiar posibles iniciativas de inversión, en distintos sectores. (A. Huenupe, 2007). En la actualidad se distinguen variados tipos de fondos de inversión pública, asignados a distintas instituciones pertenecientes al estado, donde no todos los fondos funcionan de igual forma, con mismos tiempos, ni corresponden a un mismo administrador.

De esta forma, según la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC) en su publicación "Fundamenta, 2005", presenta al FNDR como el principal instrumento financiero, mediante el cual el Gobierno Central transfiere recursos fiscales a cada una de las regiones, para la materialización de proyectos y obras de desarrollo e impacto regional, provincial y local correspondiendo su administración principalmente a los Gobiernos Regionales y a las Subsecretarías de Desarrollo regional y Administrativo.

Adicionalmente, según datos Instituto Nacional de Estadísticas (INE) de informe económico regional (2010), la actividad económica de la construcción es una de las que más ofrece empleo a los sectores de escasos recursos en la región de La Araucanía, cercano a 10% luego de la agricultura y ganadería con 25%, y por su parte es una de las actividades más vulnerables a cualquier variación que pueda ocurrir con la economía en el país o disminución que se pueda presentar en la inversión pública para infraestructura en la zona.

No obstante, el funcionamiento del aparato estatal es uno de los obstáculos de mayor prioridad que afectan el crecimiento de las Pequeñas y Medianas empresas (Bravo et al. 2002), representando las del área de la construcción sobre el 29% de las PyMes del país (INE, 2006).

Por su parte, según la legislatura 357ª, sesión 17ª del 2009 de la Cámara de Diputados, se reconocen ciertas diferencias y potenciales causas administrativas que impedirían al Estado pagar oportunamente sus obligaciones financieras a sus proveedores; así también Tapia, 2010, reconoce que es común que los proveedores pequeños (que tienen poco capital) tengan dificultades para cumplir los requerimientos de garantías que exigen los contratos, tendiendo en consideración que dichas garantías tienen un costo financiero y les significa tener un capital retenido sin generar intereses. A esto se debe agregar la tardanza en la tramitación de los pagos, práctica común entre un porcentaje importante de las instituciones del estado.

En consecuencia, es de trascendencia determinar el grado de afectación de estas causales sobre el desarrollo brindado por el FNDR en la región de La Araucanía, respecto a la ejecución de proyectos de construcción principalmente en lo referente al pago oportuno de la ejecución de estos proyectos realizados por Pequeñas y Medianas Empresas (PyMes) del área en la región.

De esta manera, por criterio de selección disponible y alcance regional, el alcance de este estudio se centró, en proyectos de construcción financiados en forma total o parcial por el FNDR y cuya ejecución ha sido inspeccionada por las Direcciones de Vialidad y Arquitectura del Ministerio de Obras Públicas de la región de La Araucanía.

2. Caracterización de las PyMes y los Obstáculos que genera el Funcionamiento del Aparato Estatal

Según Bravo et al. 2002, el funcionamiento del aparato estatal es una de las limitantes del entorno definida como de alta prioridad para los empresarios nacionales, que afecta el crecimiento de la PyMes.

Una jerarquización de los problemas que enfrenta el empresario PyME en su relación con el sector público muestra que las variables relevantes son:

- La duración de los trámites (24,8%),
- Tráfico de influencias (17%),
- El número de trámites (16,7%).

Lo anterior puede corroborarse en la Figura 1

En una escala menor (entre 11% y 10%), se encuentra la calidad de la atención, la calificación de los funcionarios y la complejidad de los trámites.

Adicionalmente, para acentuar el impacto que sobre los empresarios tienen la presencia de estos obstáculos, un 32% de éstos señaló haber perdido oportunidades de ventas durante el último año debido a los trámites y demoras de las reparticiones públicas que intervienen en la actividad, mientras que un 36% declaró haber detenido proyectos de inversión debido a los trámites y demoras de dichas reparticiones.

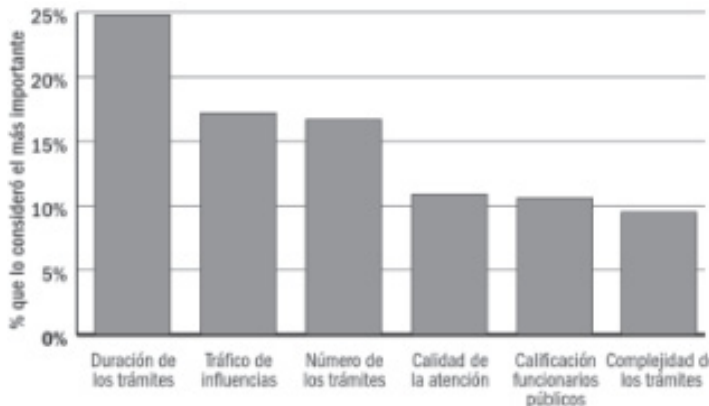


Figura 1 Obstáculos relacionados con el funcionamiento del aparato estatal (Fuente: Bravo et al, 2002; "Desarrollo se escribe con Pymes: Caso Chileno")

De igual forma un 35% de los empresarios percibe una mayor importancia en el desarrollo de los tramites del tipo municipales, principalmente asociados al tiempo de demora según se presenta en la figuras 2 y 3, por su parte el resto de tramites asociados no supera el 17% de las opiniones siendo, sin embargo la complejidad de estos la consideración de mayor importancia en su desarrollo.

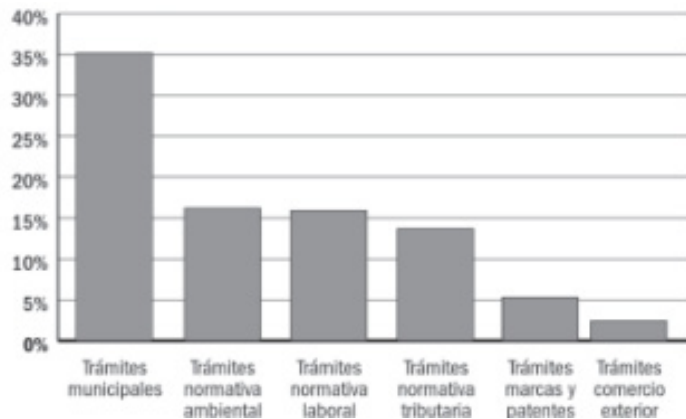


Figura 2: Tipo de relación con el aparato estatal que representa un obstáculo (Fuente: Bravo et al, 2002; "Desarrollo se escribe con Pymes: Caso Chileno")

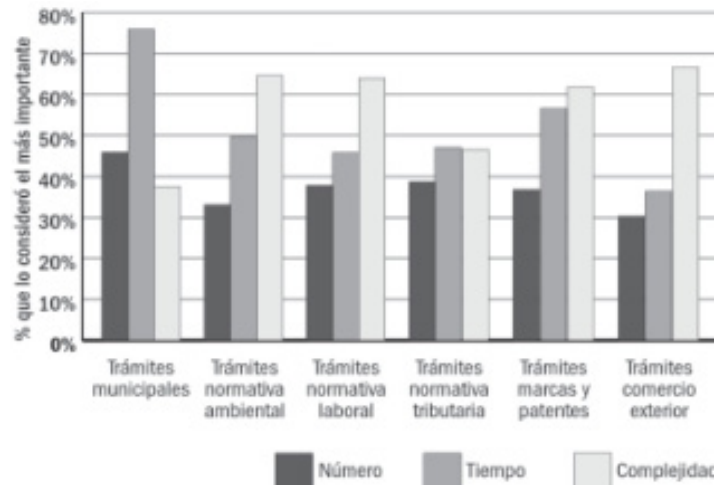


Figura 3 Motivo por el que los tramites resultan un obstáculo (Fuente: Bravo et al, 2002; "Desarrollo se escribe con Pymes: Caso Chileno")

Según la última caracterización de INE al año 2005 las empresas en Chile están segmentadas por tamaños en función del nivel de ventas anuales en los siguientes rangos:

- Pequeñas pequeñas (PP), de 2.400 a 10.000 UF
- Pequeñas grandes (PG), de 10.001 a 25.000 UF
- Medianas pequeñas (MP), de 25.001 a 50.000 UF
- Medianas medianas (MM), de 50.001 a 75.000 UF
- Medianas grandes (MG), de 75.001 a 100.000 UF

De esta manera, de acuerdo a la Primera Encuesta anual de Pequeñas y Medianas Empresas PyMes, año 2006 del INE el 86% de las empresas del rubro construcción (y que corresponden al 12,2 % de las PyMes del país) corresponden a Pequeñas empresas compuestas de un 66% PP y un 20% PG, facturando ambas el 49% del total de las PyMes del área construcción y generando el 52 % de contratación directa de trabajadores y subcontratos (15% de total contratado por las PyMes del país). Específicamente, en la región de La Araucanía el 88% (5.377 empresas) de la Pymes de la región corresponden a Pequeñas Empresas compuestas por 68% PP y 20% PG, generando el 68,9% de la contratación directa de trabajadores de la región.

3. Pago Oportuno de las Instituciones del Estado

Según legislación 357a, Sesión 17a del 2009 de la Cámara de Diputados queda de manifiesto durante la discusión, la potencial existencia de causas que impiden al Estado pagar oportunamente obligaciones comerciales a sus proveedores, donde se reconoce la preocupación ante el incumplimiento de obligaciones financieras y económicas por parte de Estado a un porcentaje importante de la población, refiriéndose específicamente a las pequeñas y medianas empresas.

Por su parte, según la circular Nº 23, de 13 de abril de 2006, del Ministerio de Hacienda y del Interior la cual fue expedida por instrucción de su excelencia la Presidenta de la República de aquel entonces, se instruye a las distintas reparticiones públicas el garantizar el pago a 30 días de sus compromisos financieros con proveedores, no obstante el Ministerio de Hacienda establece algunas precisiones al respecto, que dan señal acerca de dónde está radicado el problema y de cuáles son sus dimensiones. En primer lugar señala, se debe distinguir entre distintos sectores del aparato estatal, en especial entre el gobierno central y los gobiernos municipales.

Las herramientas con que el Ejecutivo cuenta para inducir y garantizar el pago oportuno de las obligaciones, atañen fundamentalmente al gobierno central. El Ejecutivo no cuenta con similares instrumentos en lo que respecta a los gobiernos municipales. Por lo que se precisa es importante tener claridad al respecto ya que en la medida que surjan problemas de pagos no oportunos en esos gobiernos, el gobierno central tiene bastante menos instrumentos que le permitan incidir en la situación.

Asimismo, cuando se habla de compras que en su gran mayoría se realizan a través del Mercado Público (Ex Chilecompras), es muy importante tener claro que la inmensa mayoría de los pagos se hacen dentro de los plazos comprometidos, es decir, a los 30 días. Una estadística resume la situación en este sentido. Durante el 2008, Chile-Compra recibió 1.619.000 órdenes de compra, de las cuales sólo en el 0,21 (3.400) por ciento de los casos se recibieron reclamos por retraso o incumplimiento en los plazos de pago.

Al respecto, el Ministerio de Hacienda también hace notar que al 31 de diciembre de 2008, la deuda mayor a cuarenta y cinco días, ascendía a 24.846 millones de pesos. Al 31 de marzo de 2009, esa deuda era de 12.935 millones de pesos. Es decir, en tres meses, el monto de la deuda de más de cuarenta y cinco días se redujo a la mitad.

Otro punto a abordar tratado por este Ministerio dice relación con las acciones adicionales que emprendidas y comprometidas en dicho entonces para entregar importantes incentivos al pago puntual a treinta días en el caso del gobierno central.

Para garantizar el cumplimiento de esos plazos se abordaron dos materias:

En primer lugar, se generaron los mecanismos de control de gestión ligados a incentivos, que permitieron incorporar los indicadores de pagos a treinta días como parte regular de la administración y gestión de las instituciones públicas. Es decir, cuando se evalúa a un servicio por la vía del Programa de Mejoramiento de la Gestión (PMG), uno de los criterios de esa evaluación será la puntualidad con que se cumplan los compromisos de pago a treinta días.

En segundo lugar, se han incluido en los informes periódicos vinculados al portal Gobierno Transparente un reporte bimensual del estado de pagos consolidados de cada servicio público.

No obstante en la misma sesión 17ª honorables Diputados de la nación hacen referencia a múltiples casos en que los instrumentos fijados por la institucionalidad del gobierno se han visto vulnerados afectando a empresas de distintos rubros a lo largo del país.

4. Importancia del FNDR en la región de La Araucanía

La Constitución Política de la República y, específicamente, la ley 19.175, Orgánica Constitucional sobre Gobierno y Administración Regional, definen el FNDR como: “un programa de inversiones públicas, con fines de compensación territorial, destinado al financiamiento de acciones en los distintos ámbitos de infraestructura social y económica de la región, con el objetivo de obtener un desarrollo territorial armónico y equitativo”. Al mismo tiempo que debe procurar mantener un desarrollo compatible con la preservación y mejoramiento del medio ambiente, lo que obliga a los proyectos financiados a través del FNDR a someterse a una evaluación de impacto ambiental por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

La ley 19.175, establece la asignación del 90% de los recursos a comienzos del año presupuestario, y el 10% restante se destina en igual proporción, a cubrir situaciones de emergencias y estímulos a la eficiencia, en cada ejercicio presupuestario.

Dos son las fuentes de recursos de éste instrumento: los recursos fiscales o propios, que dan origen al FNDR- Tradicional y, por otra, el préstamo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) o FNDR - BID.

El FNDR tradicional financia todo tipo de proyectos de infraestructura social, estudios y programas de los sectores de inversión pública establecidos por Ministerio de Planificación (MIDEPLAN), con excepción de las restricciones que específicamente imponga la Ley de Presupuestos del sector público.

Con el FNDR-BID se pueden financiar proyectos en todos los sectores que tradicionalmente se financian con el FNDR, excepto proyectos del sector justicia, específicamente centros de detención preventiva de adultos, penitenciaria, cárceles, comisarías, retenes, equipos de policías y capacitación. (CCHC, "Fundamenta", 2005).

Según publicación de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) "FNDR 2009", anualmente son aproximadamente 300 los proyectos en la región que se financian con fondos de desarrollo regional, teniendo en consideración que la mayoría de estos proyectos son ejecutados por empresas locales principalmente PyMes.

En la región de La Araucanía el presupuesto para el 2010 fue de M\$44.603.576. Lo ejecutado al 31 de diciembre corresponde a M\$44.028.002, correspondiente a un 98,71% del presupuesto anual.

Si se realiza una comparación de la ejecución presupuestaria de los últimos años del fondo FNDR en La Araucanía se puede inferir una tendencia al alza de la tasa de uso de los recursos como así también de la asignación a este fondo. Tal como se ilustra en la tabla 1, el año 2006 se realizó una ejecución correspondiente a M\$21.274.015 correspondiente al 94,8% del presupuesto entregado. En el año 2007 se realizó una inversión de M\$25.067.429 correspondiendo al 98,9% del presupuesto entregado a la región, el año 2008 se realizó una inversión de M\$42.686.369 siendo el 97,5 % del presupuesto entregado, el año 2009 se realiza una ejecución correspondiente a M\$46.664.129, siendo un 99,0% del presupuesto entregado. El año 2010 se realiza una inversión en la región de M\$44.028.002 correspondiente al 98,71% del presupuesto. (SUBDERE, IX región).

Año	Presupuesto M\$	Ejecución M\$	% uso
2006	22.440.944	21.274.015	94,8
2007	25.346.238	25.067.429	98,9
2008	43.780.891	42.686.369	97,5
2009	47.135.484	46.664.129	99,0
2010	44.603.386	44.028.002	98,7

Tabla 1 Comparación ejecución presupuestaria FNDR IX región.
Fuente: Elaboración propia, extraído de datos SUBDERE
Informe ejecución presupuestaria FNDR, Diciembre 2010

5. Formulación de la investigación

Este artículo está basado en el desarrollo de una investigación cualitativa de tipo exploratoria, no experimental, que consiste principalmente, en identificar las propiedades del tema en estudio, recolectando datos de primera fuente. Se hace notar la escasez bibliográfica que referencie al problema, en virtud de lo cual, la base teórica de este artículo, está referido a los autores cuyos planteamientos tienen un mayor acercamiento a los propósitos del estudio.

Para lograr el objetivo planteado se realizan entrevistas a los encargados de la programación financiera – contable del desarrollo de proyectos, en variadas empresas constructoras, todas ellas del tipo PG y de la región que trabajan en la actualidad o han trabajado con el Fondo Nacional de Desarrollo Regional, a fin de poder obtener sus opiniones de experiencias en proyectos ejecutados con éste tipo de financiamiento, en los cuales la Dirección de Arquitectura o de Vialidad del MOP de la región de La Araucanía ha actuado como Unidades Técnicas.

Las empresas entrevistadas fueron escogidas a través de criterios de representatividad, cercanía geográfica, disponibilidad y experiencia en el trabajo con proyectos de este tipo, además de contar con la asesoría y apoyo de expertos, constituyendo una muestra de más de 10 empresas constructoras, consideradas las más representativas.

Adicionalmente, se concretaron diversas entrevistas a las distintas instituciones públicas relacionadas con el funcionamiento del fondo de modo de poder contrastar, complementar y profundizar a nivel exploratorio las versiones de los distintos actores del sistema, en base a las siguientes temáticas de profundización:

- Existencia de retrasos en pagos de obras financiadas por FNDR.
- Causas críticas de retardo del sistema.
- Tipo de trámites del proceso, asociados a las causas de retardos.
- Tiempos reales de generación de pagos.

Posteriormente, se analizan la información adquirida de las distintas opiniones planteadas en las entrevistas, contrastándolas entre sí, dando énfasis en la investigación de los procesos correspondientes entre la etapa de adjudicación de un proyecto y su posterior recepción.

6. Formulación y presentación de proyectos al FNDR.

Toda iniciativa de inversión, en que sus formuladores la postulen a financiamiento a través del FNDR debe ser ingresada al Gobierno Regional (GORE), donde la División de Planificación es la encargada de revisar si los antecedentes del proyecto cumplen con las condiciones de admisibilidad. De esta forma el comité de Inversiones analiza la pertinencia de la inversión y la Intendencia toma la decisión de enviar el proyecto a la SERPLAC para la evaluación técnico-económica y la obtención de recomendación técnica, entendiéndose en ese acto la voluntad para su financiamiento. Posterior a ello el Intendente presenta un determinado proyecto o cartera de proyectos al Consejo Regional de La Araucanía, quienes revisan y autorizan, en la comisión correspondiente. Luego se presenta al Pleno del Consejo para su aprobación de financiamiento. Secuencialmente, el Gobierno Regional, específicamente el Departamento de Estudio e Inversiones de la División de Análisis y Con-

trol de Gestión, se encarga de preparar una solicitud de asignación presupuestaria, la cual firma el Intendente, y es visada por la Unidad Regional de la SUBDERE para luego ser enviada a la Contraloría Regional para su toma de razón. Esta solicitud de asignación presupuestaria puede ser de aumento, reducción y creación de montos de asignaciones de proyectos.

Una vez tomada razón de Contraloría de la asignación presupuestaria, el Gobierno Regional, específicamente el Departamento de Estudio e Inversiones de la División de Análisis y Control de Gestión, elabora el Convenio Mandato que establece la responsabilidad de la Unidad Técnica designada y del GORE para el cumplimiento de los compromisos del proyecto, el cual se remite a la Unidad Técnica (UT) para la aceptación correspondiente. Una vez firmado el mandato, éste vuelve al Gobierno Regional para la firma del Intendente y se elabora la resolución que la aprueba.

Una vez tomado razón el convenio mandato, se procede a la revisión, y autorización de bases administrativas y términos de referencia, por parte del Gobierno Regional. Éste proceso lo lleva a cabo la Unidad Técnica con el Sectorialista asignado del Departamento de Estudio e Inversiones de la División de Análisis y Control de Gestión del GORE.

7. Procedimientos de aplicación del FNDR y sus tiempos establecidos en la ejecución de una obra.

Una vez tomada razón del Convenio Mandato, la División de Análisis y Control de Gestión, que aprueba las bases administrativas, procede a autorizar el llamado a licitación pública correspondiente. Según información proporcionada por el Gobierno Regional de La Araucanía (entrevista de profundización), el proceso de adjudicación tardara 20 días si el monto ofertado se ajusta al convenio mandato, caso contrario, pero con una diferencia no mayor al 10 %, dicho proceso se extenderá a cuatro semanas, por su parte si la diferencia sobrepasa el 10% , tardará seis semanas.

Una vez entregado “el terreno” al contratista por parte de la Unidad Técnica, se comienza con la ejecución de las obras y con la generación de los estados de pago correspondientes. Estos generalmente son en forma mensual y deben ser revisados, visados y firmados por la Unidad Técnica. Luego la UT lo remite al Gobierno Regional quien inicia el trámite de pago.

El Gobierno Regional visa el estado de pago en relación al presupuesto disponible para el proyecto.

Posteriormente la unidad contable verifica la documentación del estado de pago, y de existir los recursos necesarios para realizar el pago, éste se autoriza. (Los recursos que cubren el egreso son comprometidos presupuestariamente, generando la reserva de ellos). El egreso es revisado por el Departamento Contable, quien otorga su aprobación a la salida de los recursos, para luego enviarlo a la Unidad de Tesorería para la confección del documento bancario, comprometiendo los fondos en la cuenta corriente del FNDR.

Finalmente el documento es firmado por los cuentacorrentistas autorizados, quedando disponible para el pago. El tiempo a transcurrir en este proceso varía entre los cinco a diez días a partir de cursado el estado de pago por la empresa constructora.

8. Análisis de resultados

Los resultados de la investigación realizada a través de entrevistas a empresas constructoras que han trabajado con el fondo a través de la Dirección de Arquitectura y Vialidad como Unidad Técnica, además de instituciones involucradas, arrojaron respuestas a la problemática inicial.

Entre la diversidad de opiniones, se pudo establecer puntos en los que se producen coincidencias y complementos relevantes tanto de empresas constructoras, como de las instituciones ligadas al fondo. Donde se destacan:

Existencia de retrasos en pago en caso de modificación de obra.
Existencia de retraso en pagos en caso de proyecto de arrastre en tiempos de cambio presupuestario.
Retrasos en pagos de proyectos con financiamiento de fondos mixtos.

Analizando los argumentos que se dan con respecto a estos retrasos por parte de las instituciones y empresas constructoras, se tienen procedimientos y opiniones que se plantean a continuación.

8.1 Modificación de obras

En caso de necesidad de modificación o aumento de obras en la ejecución de un proyecto, el procedimiento a seguir según Manual de procedimientos FNDR del Departamento de Estudio e Inversiones del GORE, y como lo indica la figura 4, es el siguiente:

- Contratista solicita el aumento o modificación a la Unidad Técnica.
- Unidad Técnica analiza la pertinencia del aumento, obras extraordinarias y/o disminución de obras, y emite un informe al Gobierno Regional.

- Gobierno Regional ingresa solicitud e informe a la Secretaría Regional de Planificación y Coordinación (SERPLAC) para la evaluación (sólo si esta modifica las partidas inicialmente recomendadas, si agrega partidas nuevas o modifica en alguna forma el proyecto).

- SERPLAC recomienda el aumento de obras.
- Consejo Regional aprueba el aumento de obras.
- Gobierno regional modifica convenio mandato y autoriza modificación de contrato a la Unidad Técnica.
- La Unidad Técnica modifica el contrato, renueva garantías y remite antecedentes al Gobierno Regional.

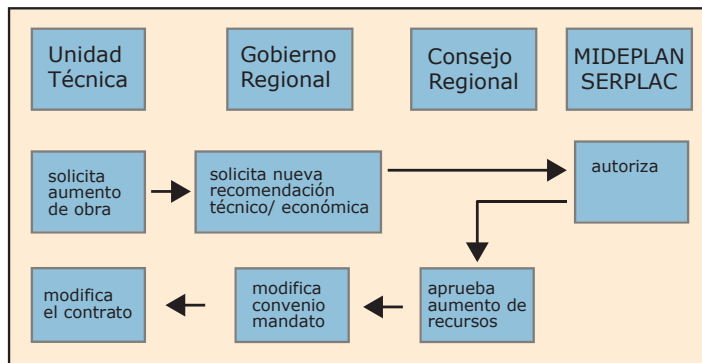


Figura 4 Procesos de Modificaciones de Obras.

Según opiniones de empresas constructoras, los pasos antes mencionados, son reconocidos efectivamente, de acuerdo a lo que es evidenciado en la práctica real. No obstante corresponde precisar que si bien las empresas no deben realizar particularmente estos trámites, deben esperar el tiempo necesario para que se realicen. Este es un episodio en el que se producen los mayores retrasos de pagos, a consecuencia del tiempo que significa obtener la autorización de esta modificación, lo que puede llegar a tardar hasta tres meses según concordancia plena de las opiniones obtenidas desde entrevistas realizadas a empresas, tal como se ilustra en la figura 5.

Una vez obtenida la autorización, se puede ejecutar la modificación y efectuarse la cancelación de esta según lo establecido en el contrato, sin tener aquí tardanza posteriores de cancelaciones. Así mismo se evidencia que los aumentos de obra de corto período de ejecución o bien que se encuentran en periodo de culminación (últimos meses de plazo), debido a que su autorización puede tardar meses, hacen necesario solicitar anticipadamente un aumento de plazo de ejecución por trámites administrativos, de modo que la autorización de modificación no se produzca cuando haya concluido el tiempo establecido.

En base a lo anterior y de tal manera de evitar perjuicios, las empresas constructoras experimentadas proveen ciertas consideraciones ante posibles pérdidas que se pueden producir durante el tiempo que se debe esperar la autorización, principalmente por concepto de gastos generales e indirectos.

Instituciones del estado coinciden con éste planteamiento, los que además afirman que los trámites a realizar, si bien retrasan la ejecución, son estrictamente necesarios.

8.2 Proyecto de arrastre

Se dice que un proyecto de “Arrastre” es un proyecto adjudicado al 31 de Diciembre e ingresado al Banco Integrado de Proyectos (BIP) o bien se encuentra en ejecución a esta fecha. Este proyecto no necesita ser enviado nuevamente al CORE, y pasa aprobado al siguiente año.

Para los proyectos denominados de “Arrastre” se debe realizar una “Creación de Asignación”, la cual se realiza proyecto a proyecto con cierre del año al ocho de enero, donde se ingresa todo el gasto del año anterior al BIP, además de un listado con los antecedentes de todos los proyectos de arrastre, trámite que en general se termina entre el veinticuatro y treinta y uno de Enero para ser enviados a Contraloría Regional. Los antecedentes resueltos por Contraloría aproximadamente a la primera quincena del mes de Febrero y son enviados nuevamente al GORE, donde una vez corroborada la información, los proyectos vuelven a la normalidad, con respecto a lo administrativo y generación de pagos.

El retraso de pago se produce entonces en el mes de Enero, siendo cancelado el estado de pago de éste mes durante la segunda quincena de Febrero. Existen casos en los que se puede retrasar hasta Marzo, esto ocurre sólo en casos justificados, en los que ocurre un error en la creación de asignación y ésta se debe corregir, por lo que el tiempo se duplica con relación a lo normal (figura 5), debiendo ser enviado nuevamente a Contraloría, y luego ser reenviando al GORE.

Empresas constructoras plantean que el retraso por este motivo es presumible por lo que su consideración implica tomar los resguardos económicos correspondientes, de tal manera de no generar un impacto de trascendencia. Se bien se deja notar que el problema existe, según opinión de empresas su impacto es relativo y no llega a poner en riesgo la ejecución de la obra, ni perjudicar mayormente a la empresa ejecutora.

La percepción de las instituciones entrevistadas coincide con las empresas, debido a que no se registran reclamos por problemas producidos por este motivo.

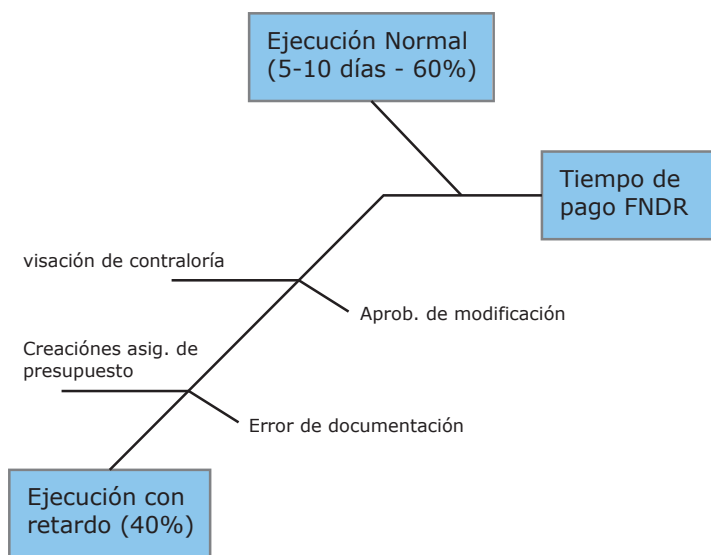


Figura 5 Principales eventos que influyen en los tiempos de pagos.

8.3 Retrasos en pagos de proyectos financiados con fondos mixtos

Los proyectos financiados con fondos mixtos o cofinanciados, se refieren a proyectos que su ejecución es financiada por dos o más fondos pertenecientes al estado, pero de diferentes mandantes con fines comunes.

En el caso del Fondo Nacional de Desarrollo Regional para la Región de La Araucanía, esto sólo ha sucedido en el caso de complementarse con aportes “Jornada Escolar Completa” (JEC) perteneciente al Ministerio de Educación, el cual está dirigido a la ampliación y adecuación de establecimientos educacionales municipales a fin de aportar a la comunidad recintos donde se pueda desarrollar una jornada escolar completa de calidad, de forma cómoda para los alumnos.

Este programa ya se ha implementado casi en su totalidad en la región faltando al 2011 sólo dos establecimientos por modificar. Cabe señalar que al intervenir diferentes mandantes en la cancelación del proyecto, la empresa ejecutora debe cursar estados de pagos independientes a cada mandante.

Las empresas entrevistadas en ésta investigación han participado en la ejecución de proyectos financiados con este complemento de fondos. Las que desde su punto de vista plantean una insatisfacción, respecto a la experiencia que se tuvo al trabajar con estos fondos mixtos coincidiendo en un 100% al respecto, entre ellas.

Si bien al capturar la percepción separada por fondo de inversión, el FNDR funcionó normalmente cumpliendo con lo establecido, y sin mayores retrasos en sus pagos; el fondo JEC no es evaluado de la misma manera, debido a que las empresas plantean que sus pagos se retrasaban hasta en cuatro meses.

La Dirección de Arquitectura del MOP al actuar como UT, confirma el planteamiento de las empresas constructoras, corroborando la tardanza de los pagos del fondo complementario al FNDR. De igual manera el GORE asegura que el FNDR siempre funciona de igual forma y que los retrasos han sido sólo de parte del aporte JEC.

Se debe tener presente que la forma de funcionar es diferente, debido a que son distintos mandantes.

En la figura 6 se muestra de forma gráfica las mayores causales de retrasos destacadas, además de las espinas de potenciales orígenes de cada una de ellas, destacando las “modificaciones de obra” como la causal de mayor impacto en el retraso de las cancelaciones de proyectos financiados mediante FNDR.

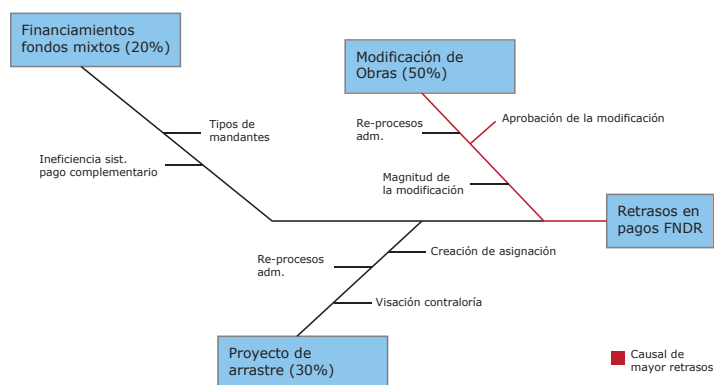


Figura 6 Causales de retrasos en cancelaciones de obras con financiamiento FNDR

9 Conclusiones

En consecuencia, se puede conjeturar respecto a las opiniones y experiencias de las empresas que han trabajado en proyectos financiados con el FNDR en la región de La Araucanía, que en un 60% de los casos se presenta una ejecución normal, es decir una obra realizada según la planificación inicial y sin mayores obstáculos que impidan el pago oportuno, el cual se hace efectivo dentro de los plazos establecidos por el sistema.

Por su parte, si bien el 40% restante reconoce retrasos, tanto las instituciones como las empresas constructoras los categorizan como períodos menores, caracterizándolos como justificados y reconociendo como no significativos los impactos financieros que ocasiona sobre el desarrollo del proyecto, aludiendo esta percepción como resultado de la experiencia y nivel de planificación de las empresas de la región, la antigüedad de funcionamiento del fondo y el comportamiento previsible del proceso de cancelación en obras con este tipo de financiamiento.



No obstante, durante el transcurso de ejecución de diferentes proyectos de construcción, se hacen notar, tres causas críticas de retardo en el sistema, con el siguiente porcentaje de ocurrencia:

Solicitud de pagos en proyectos que requieren modificaciones de obra (50%)
Solicitud de pago en periodo de cierre del año presupuestario (Proyectos de arrastre) (30%).
Solicitud de pago en proyectos que tienen financiamiento mixto (20%).

De acuerdo a esta situación, los tiempos reales de efectividad del proceso de pago, varían dependiendo del tipo de causa en que se vea envuelto el proyecto. En una obra con ejecución normal, el proceso de cancelación se lleva a cabo en el transcurso de cinco a diez días hábiles desde que es cursado el estado de pago por la empresa, no obstante este plazo se ve incrementado, a 17 días hábiles en periodos donde hay coincidencia con el cierre del año presupuestario, pudiendo llegar 24 días hábiles en caso de inconvenientes involuntarios que requieran reparaciones y la re-aprobación de Contraloría.

Cuando se requiere la previa aprobación de modificaciones al proyecto, para dar inicio a la obra o durante el transcurso de estas, cuyo plazo es de alrededor de 45 días hábiles en el caso de proyectos exentos del visado de Contraloría y 60 días hábiles en aquellos que requieren este procedimiento, para luego tener posibilidad de cursar el estado de pago, cuyo tiempo está asociado al proceso de cancelación normal.

Cuando se deben cursar estados de pagos para dos mandantes independientes (Financiamiento mixto), donde según las opiniones de las empresas, en la porción específica asociadas a la cancelación con el FNDR los plazos no varían mas allá de 5 a 10 días hábiles, no teniendo el mismo comportamiento el fondo complementario, llegando a extenderse el pago de esta porción a más de 60 días hábiles, según sea la fuente de financiamiento aludida.

De esta forma, las instituciones plantean que los diversos trámites realizados en distintas ocasiones son estrictamente necesarios, no obstante validan la necesidad de mejorar la eficiencia de ciertos procesos en base a reestudiar la gestión operativa interna y de comunicación entre las diferentes instituciones públicas relacionadas con el proceso para reducir los tiempos, desprendiéndose específicamente la necesidad definir la pertinencia de criterios de aceptación, adecuando la flexibilidad de enmienda ante la necesidad de ciertas correcciones en los antecedentes constituyentes del proyecto, cuyos percances en la actualidad implican llevar a cabo laboriosos re-procesos con gasto de los recursos humanos e inversión de tiempo.

Adicionalmente en condiciones de régimen normal, el estudio refleja que la efectividad del sistema depende en gran medida de la Unidad Técnica asociada a la realización del proyecto, influyendo su eficiencia y afiatamiento de los procesos, directamente sobre los tiempos totales de los procedimientos que implican la cancelación oportuna.

10 Referencias

- Cámara Chilena de la Construcción, Agosto 2005, "Fundamenta 25: Fondo Nacional de Desarrollo Regional".
Ley 19.175, 2003, "Orgánica Constitucional sobre Gobierno y Administración Regional".
Gobierno Regional de La Araucanía, 2010, "Anteproyecto Regional de Inversiones ARI 2011".
Molina A., Intendente y Ejecutivo Regional, "Cuenta Pública 2010 Región de La Araucanía".
Huenupe A., 2007, Trabajo de Título: "Método de financiamiento FNDR para proyectos de Infraestructura", Universidad de La Frontera.
Gobierno de Chile, SUBDERE, División de Administración y Finanzas, "Informe de Ejecución Fondo Nacional de Desarrollo Regional 2009".
Gobierno de Chile, Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, "Informe de Ejecución Fondo Nacional de Desarrollo Regional 2010".
Instituto Nacional de Estadísticas, 2010, "Informe Económico Regional 2010".
Araya P., Gerencia de Estudios-Cámara Chilena de la Construcción, 2005, Documento de trabajo N°26 "El Fondo Nacional de Desarrollo Regional en la Inversión Pública y la actividad Constructora".
Bravo D., Gustavo C., Gutiérrez I. 2002. "Desarrollo se Escribe con PYME: el Caso Chileno", p 67-69.
Tapia L. 2010. Pago oportuno del estado a las empresas de menor tamaño. Universidad de Arte y Ciencias Sociales ARCIS. Chile
- Direcciones electrónicas.
Cámara Chilena de la Construcción.
www.cchc.cl Acceso 07 Mayo 2011.
Dirección de presupuestos.
www.dipres.cl Acceso 07 Mayo 2011.
Gobierno Regional de La Araucanía.
www.laaraucania.cl Acceso 22 Abril 2011.
Ministerio de Obras Públicas.
www.mop.cl Acceso 30 Abril 2011.
Subsecretaría de Desarrollo Regional.
www.subdere.cl Acceso 23 Abril 2011.
Mercado Público.
www.mercadopublico.cl Acceso 08 Junio 2011.
Instituto Nacional de Estadísticas.
www.ine.cl Acceso 09 Junio 2011.



Proceso de revisión por pares

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, tecnológico y académico.

El Editor enviará el artículo a un árbitro (miembro del Comité Editorial) especialista en el área del tema, el cual deberá realizar su evaluación de acuerdo a una pauta previamente confeccionada. Este árbitro 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 árbitros o 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 árbitros 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 artículos para evaluar.



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