



**UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA**

Facultad
de Ingeniería
& Ciencias





Como Universidad de La Frontera, hemos iniciado un nuevo periodo, en el que la internacionalización se alza como una de sus principales líneas de desarrollo, eje que desde la Dirección de Investigación continuaremos impulsando con gran ahínco.

En un entorno de generación de conocimiento cada vez más dinámico, la convergencia de lo local con lo global hoy se evidencia como una necesidad para quienes han seguido la senda de la investigación y el desarrollo científico-tecnológico.

De esta manera y visualizándola como una estrategia de internacionalización, la revista de Ingeniería de Obras Civiles (RIOC), del Departamento de Ingeniería de Obras Civiles de la Facultad de Ingeniería y Ciencias, es un muy buen ejemplo de hacia donde debemos orientar nuestros esfuerzos de divulgación del conocimiento y su posicionamiento.

Al igual que en sus ediciones anteriores, este nuevo número de RIOC nos presenta innovadores resultados de investigación, tanto de nuestro país como del extranjero, que abarcan distintas problemáticas asociadas al campo de la construcción y que, en su conjunto, buscan brindar una mejor calidad de vida a las personas.

Bajo esa mirada, la periodicidad de esta publicación ha contribuido no sólo a mejorar el impacto de nuestra Universidad a nivel nacional e internacional, sino que también a incrementar la vinculación y colaboración con otras instituciones, permitiéndonos enriquecer el trabajo que se está realizando, como así también a tomar nuevos desafíos.

Dr. César Arriagada Escamilla
Director de Investigación
Universidad de La Frontera



RIOC 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 en todos los profesionales del área de la construcción por estar continuamente actualizados, 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, RIOC 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, RIOC 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



Directora
Viviana Letelier

Editor Responsable
Leonardo Sierra

Editores de Producción
Camila Parodi
Daphne Bormann
Javier Vidal
Gonzalo Valdés

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

Comité Editorial

Ph.D Pedro Muñoz

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chile, Talca, Chile.

Ph.D. Alejandra Calabi

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

Ph.D. Tatiana Amaral

Universidade Federal de Goiás, Jataí, Brasil.

Ph.D. Adriana Martínez

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

MSc. Carlos Andrés Aguirre

Escuela de Construcción Civil, Universidad de Las Américas, Santiago,
Chile.

Ph.D. Oscar Link

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

Ph.D. Galo Valdebenito

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

PhD. Kevin Luna Villarreal.

Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico y de Estudio
Superiores de Monterrey, Monterrey, Mexico.

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.

PhD. Ramón Botella

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

Ph.D. Virginia Vásquez

Departamento de Arquitectura, Universidad Austral, Valdivia, Chile.



Sumario

- 07.** Evaluación de la durabilidad a fatiga de mezclas semicalientes con adición de zeolita natural y RAP.
Evaluation of fatigue durability of warm mix asphalt with addition of natural zeolite and RAP
P. Loren, L. Mardones, G. Valdes, A. Calabi-Floody, E. Sanchez-Alonso
- 17.** Elementos de Reemplazo de Tuberías para el Análisis del Flujo Transitorio en Redes de Tuberías.
Pipe Replacement Elements for Unsteady Flow Analysis in Pipe Networks.
J. Twyman.
- 25.** A Pressure-Sensitive Approach for Transient Analysis of Uniformly Distributed Demands.
Un Enfoque Sensible a la Presión para el Análisis Transitorio de Demandas Uniformemente Distribuidas.
J. Twyman.
- 35.** Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad histórica de Oviedo.
Sustainable Urban Drainage Systems and the new green streets design paradigm for stormwater management: A proposal for the historical city of Oviedo.
N. Vallina, C. Costales-Campa, R. Fernández, F. Robleda-Alvarez, L.A. Sañudo-Fontaneda,



Evaluación de la durabilidad a fatiga de mezclas semicalientes con adición de zeolita natural y RAP.

Evaluation of fatigue durability of warm mix asphalt with addition of natural zeolite and RAP.

P. Loren¹, L. Mardones¹, G. Valdes¹, A. Calabi-Floody¹, E. Sanchez-Alonso¹

¹Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.
gonzalo.valdes@ufrontera.cl, teléfono: +56-45-2325680.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido

19-04-2018

Aceptado

25-05-2018

Publicado

09-11-2018

Palabras Clave:

Mezcla asfáltica

Comportamiento a

fatiga

Mezclas

semicalientes

RAP

Zeolita natural

Article history:

Received

19-04-2018

Accepted

25-05-2018

Available

09-11-2018

Keywords:

Asphalt mixture

Fatigue behavior

Warm mix asphalt

RAP

Natural zeolite

Resumen

Este artículo presenta los resultados de una evaluación del deterioro por fatiga en mezclas asfálticas semicalientes y semicalientes recicladas con adición de pavimento asfáltico reciclado (RAP), las cuales se comparan con una mezcla convencional de referencia (HMA). La falla por fatiga es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. Se caracteriza por la producción de una microfisuración inicial, y debido a la repetición de las cargas producidas por el tráfico, el deterioro va progresando hasta producir el fallo por fatiga del pavimento. Para el estudio experimental, se evaluaron cinco mezclas asfálticas desarrolladas en el proyecto IDEA/CONYCIT, denominado "Desarrollo y Diseño de Mezclas Asfálticas de Mayor Eficiencia Energética y Bajo Impacto Ambiental", de las cuales, dos son mezclas asfálticas semicalientes con distintos porcentajes de adición de zeolita natural 0,3% y 0,6% y tres son mezclas asfálticas semicalientes recicladas con tasas de adición de RAP 10%, 20% y 30%. Todas cumplen con la normativa nacional vigente. Para la realización de este estudio, se evalúa el daño por fatiga mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas de la norma UNE-EN 12697-24:2004+A1:2007. Adicionalmente, se evaluaron los parámetros de módulo de rigidez y densidad cuyos procedimientos están normados por la norma europea UNE-EN 12697-26:2012 y la normativa chilena MCV8 8.302.38, respectivamente. Una vez obtenidas las leyes de fatiga para cada mezcla, se realizan análisis de durabilidad de pavimentos. Para esto, se propone una estructura de pavimento compuesta de capas de mezcla asfáltica, capas granulares y subrasante. Se evalúan diferentes espesores de pavimento, los cuales mediante el método de diseño empírico mecanicista se determinan las durabilidades de las mezclas en estas estructuras de pavimento. Los resultados globales muestran que al utilizar las mezclas semicalientes con adición de zeolita natural, se pueden obtener desempeños similares al ser comparadas con una mezcla HMA convencional. Resultado diferente es el obtenido por las mezclas semicalientes recicladas con distintos contenidos de RAP, debido a que se obtienen mayores rigideces. En este contexto, se recomienda usar este tipo de mezclas, de forma similar a las mezclas de alto módulo en capas intermedias de estructuras de pavimento para así aumentar la duración a la fatiga.

Abstract

This paper shows the results of an evaluation for fatigue deterioration in warm mix asphalt mixtures (WMA) and WMA with the addition of recycled asphalt pavement (RAP) which are compared with a conventional reference mixture (HMA). Fatigue failure is one of the most frequent deterioration mechanisms in flexible pavements. It is characterized by the production of an initial micro cracking, and the repetition of loads produced by the traffic, the deterioration progresses until producing the fatigue fail of the pavement. For the experimental study, five asphalt mixtures developed in the project IDEA / CONYCIT, called " Desarrollo y Diseño de Mezclas Asfálticas de Mayor Eficiencia Energética y Bajo Impacto Ambiental " were evaluated, which two are asphalt mixtures with different percentages of addition of natural zeolite 0.3% and 0.6% and three are recycled asphalt mixes with 10%,



20% and 30% RAP addition cups. All mixtures fulfill the Chilean standard. To complete this study, the fatigue damage is evaluated by means of the fatigue indirect tensile, UNE-EN 12697-24:2004+A1:2007 standard. Additionally, the stiffness modules and density whose procedures are regulated by the UNE-EN 12697-26:2012 and the Chilean standard MCV8 8.302.38 were evaluated respectively. When the fatigue laws for each evaluated mixtures were obtained, a durability analysis of pavements was realized. For this, a type pavement structure composed of wearing asphalt layer, granular layers and subgrade was proposed. Different pavement thicknesses were evaluated by the mechanical empirical design method determining the asphalt mixtures durability in these pavement structures. The results showed that using the WMA with the addition of natural zeolite, similar performances were obtained in relation to conventional HMA mixture. Different results obtained by recycled WMA because of higher stiffness compared to HMA. As a result, it is recommended to use this type of mixtures, similar to the high modules mixtures, in intermediate layers of pavement structures to increase the duration to fatigue of the pavement.

1. Introducción.

Una realidad a nivel mundial es el gran porcentaje de pavimentos construidos con asfalto. En Europa se estima que más del 90% de caminos y carreteras son pavimentos flexibles construidos con asfalto. Así mismo, en Estados Unidos más del 92% de las estructuras de pavimentos están fabricadas con dicho material [1]. Chile, en toda su extensión, posee una red vial de aproximadamente 82.000 km. De esta red, solo un 25% corresponde a una red vial pavimentada, y del total de los caminos pavimentados, un 86% corresponde a pavimento asfáltico [2]. El alto porcentaje de utilización de este material a nivel global hace que la industria de pavimentación asfáltica busque nuevas soluciones de ingeniería para avanzar hacia prácticas de construcción más sostenibles. Los enfoques generales para mejorar la sostenibilidad de la industria de la pavimentación vial se basa principalmente en dos aspectos: a) la reutilización de materiales provenientes de la propia industria que permite la reducción del contenido de ligante y áridos vírgenes en las mezclas y b) la reducción de la energía consumida y las emisiones generadas en el proceso de la producción de las mezclas [3]. Esto permite indicar, que la industria de los pavimentos enfrenta la necesidad de reducir impactos ambientales relacionados con la utilización de materias primas, el uso de energía y emisiones [4].

En el contexto anterior, la industria de la construcción de carreteras se ha enfocado en mejorar o igualar las propiedades mecánicas de las mezclas mediante desarrollos de nuevas tecnologías más sustentables. Una de éstas, es la fabricación de mezclas asfálticas semicalientes (WMA) que se caracterizan por permitir su fabricación y colocación a menores temperaturas. Para ello, utilizan aditivos químicos, sintéticos o naturales [5], [6]. Otra línea de trabajo, es mediante la reutilización de pavimentos en desuso o pavimentos asfálticos reciclados (RAP) [5]. El RAP se genera a través del fresado de los pavimentos luego de ocurrido

la degradación de éstos debido a la acción del tráfico y a las condiciones climáticas a lo largo de la vida útil [7]. Ambas técnicas pueden ser utilizadas conjuntamente en el desarrollo de mezclas más sostenibles ambientalmente.

Uno de los deterioros más frecuentes en los pavimentos asfálticos es la fisuración por fatiga. Este deterioro se debe a la acumulación de daño producto de cargas repetidas de tráfico pesado bajo ciertas condiciones climáticas establecidas. Este fenómeno hace que los pavimentos se deterioren gradualmente producto de la formación de micro fisuras iniciales, las cuales se fusionan en una red, dando lugar a macro grietas y colapso estructural [8]. La respuesta a la fatiga de las mezclas asfálticas generalmente se evalúa a través de ensayos cíclicos o dinámicos de laboratorio, donde las mezclas asfálticas se someten a ciclos de carga sinusoidal. A medida que aumenta el número de ciclos, se produce una pérdida significativa en la rigidez del material [8]. En contexto, la literatura indica que la utilización de aditivos WMA mejora el rendimiento de la fatiga de las mezclas bituminosas [5]. Por el contrario, algunos estudios indican que al adicionar RAP a las mezclas podría disminuir la vida a la fatiga debido a la presencia de ligante envejecido [9]. Sin embargo, existen estudios que mencionan que cuanto mayor sea la rigidez, mayor vida y resistencia al fenómeno de fatiga tendrá la mezcla [10].

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, en este estudio se evalúa el daño por fatiga en mezclas asfálticas semicalientes con incorporación de zeolitas naturales y mezclas semicalientes recicladas (con adición de RAP y zeolitas naturales) mediante el método de tracción indirecta en probetas cilíndricas, de acuerdo a la norma UNE EN 12697-24:2004+A1:2007. Adicionalmente, se presenta un análisis de durabilidad de estructuras de pavimento de diferentes espesores compuestos por las mezclas evaluadas.

2. Estudio experimental

En este apartado se presenta una descripción del plan experimental, materiales y métodos utilizados para la evaluación del daño por fatiga en mezclas asfálticas semicalientes con adición de zeolita natural, así como mezclas asfálticas semicalientes con adición de RAP en diferentes porcentajes.

2.1 Plan experimental

En el plan experimental se consideró un ligante tipo CA-24 para las seis mezclas evaluadas, **Tabla 1**. En primer lugar se encuentra la mezcla de referencia denominada HMA, posteriormente las mezclas asfálticas semicalientes con adición de zeolita natural en

0,3% y 0,6% denominadas WMA/03 y WMA/06, respectivamente. Finalmente, se encuentran las mezclas semicalientes recicladas con adición de zeolita natural en 0,6% y RAP en distintos porcentajes: 10%, 20% y 30%. Estas se han nombrado como WMA/R10, WMA/R20 y WMA/R30, respectivamente. El porcentaje óptimo de cemento asfáltico, granulometría y temperaturas de compactación fueron obtenidos en estudios previos por medio de diseño de mezclas acorde al procedimiento Marshall que se especifica en la normativa Chilena [11] [12]. El porcentaje de cemento asfáltico utilizado fue de un 5,4% sobre el peso de los áridos, mientras que la temperatura de fabricación para las mezclas semicalientes con adición de zeolitas WMA fue de 135°C (20°C menos que la mezcla de referencia), y las mezclas semicalientes recicladas WMA/R10, WMA/R20 y WMA/R30 fue de 125°C, 135°C y 145°C, respectivamente.

Tabla 1 Nomenclatura y descripción de mezclas evaluadas.

Mezcla	Descripción	Temperatura de fabricación (°C)
HMA	Mezcla asfáltica de referencia o patrón	155
WMA/03	Mezcla asfáltica semicaliente con adición de zeolita de 0,3 % s/a	135
WMA/06	Mezcla asfáltica semicaliente con adición de zeolita de 0,6 % s/a	135
WMA/R10	Mezcla asfáltica semicaliente reciclada con adición de zeolita de 0,6 % s/a y 10% de RAP	125
WMA/R20	Mezcla asfáltica semicaliente reciclada con adición de zeolita de 0,6 % s/a y 20% de RAP	135
WMA/R30	Mezcla asfáltica semicaliente reciclada con adición de zeolita de 0,6 % s/a y 30% de RAP	145

2.2 Materiales: áridos y ligante

Para este estudio se utilizó una mezcla asfáltica semidensa tipo IV-A-12, ampliamente utilizada en Chile para la construcción de capas de rodadura e intermedia, **Figura 1**. Los áridos utilizados fueron de origen fluvial y su caracterización se presenta en la **Tabla 2**. Los ligantes asfálticos utilizados fueron de tipo CA-24 y sus características son las que indican en la **Tabla 3** (se utilizó el menos viscoso en la mezclas semicalientes recicladas con RAP). La caracterización de la zeolita natural del tipo clinoptilolita-mordenita micronizada se observa en la **Tabla 4**. El RAP utilizado fue obtenido mediante el fresado en las obras de mantenimiento y rehabilitación del bypass Temuco. La caracterización del RAP utilizado se registra en la **Tabla 5**.

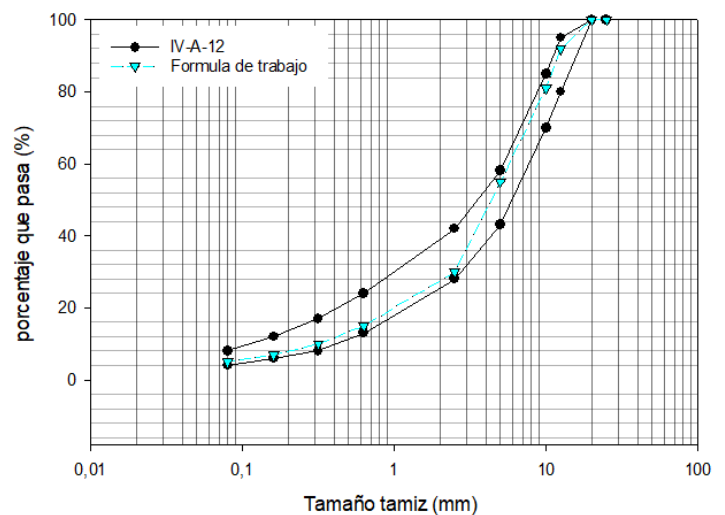


Figura 1 Granulometría de mezcla IV-A-12 utilizada en el estudio.

Tabla 2 Propiedades físicas de los áridos.

	ENSAYO	NORMATIVA	RESULTADO	LÍMITE
FRACCIÓN GRUESA	Desgaste Los Ángeles (máx.)	MCV5 8.202.11	18,4%	25%
	Desintegración en sulfato de sodio (máx.)	MCV5 8.202.17	2,4%	12%
	Partículas chancadas (mín.)	MCV5 8.202.6	97,3%	90%
	Partículas lajadas (máx.)	MCV5 8.202.6	2,7%	10%
	Adherencia método estático (mín.)	MCV5 8.302.29	>95%	95%
	Adherencia método dinámico (mín.)	MCV5 302.31	>95%	95%
FRACCIÓN FINA	Índice de plasticidad	MCV5 8.102.4	NP	NP
	Adherencia Rledel – Weber (mín.)	MCV5 8.302.30	0-9	0-5
	Desintegración sulfato de sodio (máx.)	MCV5 8.202.17	1,4%	15%
MEZCLA DE ÁRIDOS	Sales solubles (máx.)	MCV5 8.202.14	0,5%	2%
	Equivalente de arena (mín.)	MCV5 8.202.9	81%	50%

Tabla 3 Propiedades de los cementos asfálticos utilizados.

ENSAYOS	RESULTADOS CA24 (1)	RESULTADOS CA24 (2)	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Viscosidad Absoluta a 60°C (P)	3730	3000	Min. 2400	MC 8.302.15
Penetración, 25°C, 100g, 5s (dmm)	60	52	Min. 40	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5cm/min (cm)	> 100	> 100	Min. 100	MC 8.302.8
Mancha Heptano Xilol (%Xilol)	< 30	< 30	Max. 25	MC 8.302.7
Punto de Inflamación copa abierta (°C)	> 232	> 232	Min. 232	MC 8.302.9
Punto de Ablandamiento (°C)	52,0	50,0	Informar	MC 8.302.16
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	99,8	99,5	Min. 99.0	MC 8.302.11
Índice de Penetración (IP)	-0.2	-1.1	Min. -1.5 - Max 1.0	MC 8.302.18
ENSAYES DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA				
Perdida por calentamiento (%)	0,02	0,02	Max. 0.8	MC 8.302.33
Viscosidad Absoluta a 60°C (Residuo)(P)	8800	6300	Informar	MC 8.302.15
Ductilidad de residuo, 25°C, 5cm/min (cm)	> 100	> 100	Min. 100	MC 8.302.8
Índice de durabilidad (ID)	2.4	2.1	Max. 3.5	Residuo/Original

Tabla 4 Caracterización de la zeolita natural micronizada

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO	
Descripción	Zeolita natural clinoptilolita-mordenita
Nombre químico	Aluminosilicatos cálcico potásico magnésico hidratado
Granulometría utilizada	0 – 0,173 [mm]
CARÁCTERÍSTICAS MINERALÓGICAS	
Componentes zeolítico principal	Clinoptilolita-Mordenita
Otros componentes	Plagioclasa, Esmeclita y Cuarzo
Color	Marfil
CARÁCTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	
Composición química (%)	SiO_2 : 64,19 TiO_2 : 0,51 Al_2O_3 : 11,65 Fe_2O_3 : 2,53 MnO : 0,03 MgO : 0,66 Na_2O : 0,75 K_2O : 1,60 P_2O_5 : 0,03 PxC : 14,64
Capacidad de intercambio catiónico (cic)	86,82 a 112,88 [$cmol/kg$]
Superficie específica (método bet)	446 a 480 [$m^2 g^{-1}$]
Estabilidad térmica	< 450 °C
Estabilidad química	8,9
DENSIDAD	0,661 [g/cm^3]

Tabla 5 Caracterización del RAP utilizado.

Fracción RAP	0/5	5/20
Contenido de ligante (% por peso de mezcla)	7,5	3,3
Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)	
20	100	100
12,5	100	73
10	100	56
5	100	29
2,5	70	18
0,63	35	11
0,315	25	8
0,16	19	5
0,08	15	4

2.3 Métodos utilizados

El módulo de rigidez fue determinado por medio del procedimiento que indica la norma UNE-12697-26:2012 anexo C, ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY). Se denomina módulo resiliente o de rigidez a aquel que durante pruebas de carga repetida y luego de un cierto número de ciclos de carga, permanece constante [13]. Los impulsos de carga deben ser aplicados de tal forma que sean impulsos repetidos

que se alternen con periodos de descanso. Se deben aplicar, al menos 10 impulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración. Para el cálculo del módulo de rigidez medido se utilizan las mediciones de 5 impulsos de carga [14]. Las probetas fueron acondicionadas a 20°C y los ensayos fueron realizados a la misma temperatura de acondicionamiento.

El comportamiento a fatiga fue determinado por medio del ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas realizado según las especificaciones descritas en el anexo E de la norma europea UNE-EN 12697-24:2006+A1. Se ensayaron cinco probetas por cada nivel de tensión y éstas fueron acondicionadas y ensayadas a 20°C. El ensayo de fatiga proporciona el número de ciclos que resiste la mezcla hasta su fallo. El tipo de criterio de fallo convencional, que es el utilizado en este procedimiento, se define como el número de aplicaciones de carga necesario para que las deformaciones alcancen el doble de su valor inicial [15]. La ley de fatiga se determinó de acuerdo a lo indicado en la ecuación (1).

$$\varepsilon = k_1 * N^{k_2} \quad (1)$$

Donde,

ε : deformación;
N: número de aplicaciones de carga;
 k_1, k_2 : constantes del material.

2.4 Análisis de durabilidad

El análisis de durabilidad en las mezclas se realizó fijando parámetros base de un pavimento tipo. El método utilizado para determinar la durabilidad a fatiga del material fue el método empírico mecanicista. Éste se basa en dos componentes; el

primero, el componente mecánico que analiza los esfuerzos y deformaciones que se producen en una estructura de pavimento. El segundo, el componente empírico que relaciona la respuesta mecánica del pavimento con leyes de fatiga determinadas experimentalmente. Se utilizó el software de uso libre PITRA-PAVE para el análisis estructural de pavimentos flexibles el cual permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas [16]. Los parámetros base para el análisis de durabilidad de las mezclas se exponen en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Parámetros base para análisis de durabilidad de mezclas.

Módulo (MPa)	Poisson (μ)	Espesor (m)	Descripción
184,34	0,35	0,25	Capas granulares
76,83	0,35	∞	Suelo de fundación CBR 10%

Se analizaron diferentes espesores para la capa del pavimento asfáltico en un rango de [5-30] cm con 5 cm de diferencia entre capas. Además se evaluaron capas de pavimento mixto en las cuales las mezclas de mayor módulo se encuentran en la parte intermedia dejando como capa superior e inferior la mezcla de referencia (HMA). Para ese análisis se evaluaron capas de pavimento en un rango de [15-30] cm aumentando en 3 cm el espesor como se observa en la **Figura 2**.

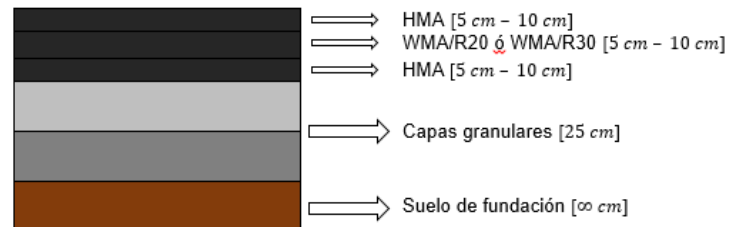
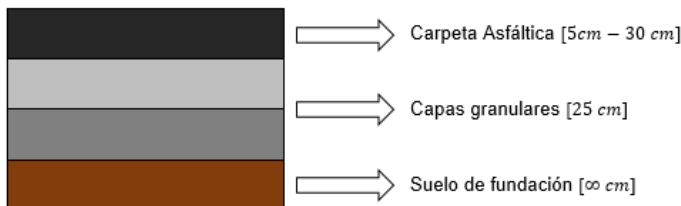


Figura 2 Estructuras de pavimentos analizadas.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos para las densidades y módulos de rigidez promedios de las mezclas evaluadas se presentan en la **Figura 3**. Se observa que aquellas mezclas con adición de 0,3% y 0,6% de zeolita natural presentan densidades similares a la mezcla de referencia patrón registrando leves aumentos de 0,25% y 0,46%, respectivamente. Este aumento puede atribuirse a una disminución del porcentaje de huecos por la adición de zeolita natural como material fino ya que, según indica Sengoz et al. (2017), las zeolitas se comportan como partículas de relleno

mineral [5]. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Wozzuk y Franus (2016), quien registró mínimos aumentos en la densidad al adicionar zeolita natural [17]. Así mismo, las mezclas con mayor adición de RAP 20% y 30%, mostraron un aumento levemente mayor de densidad 1,7% y 1,9%, respectivamente. Esto puede deberse a la presencia de zeolita natural en un 0,6% como material fino y a una mayor concentración de finos en el pavimento reciclado. La mezcla con adición de RAP en un 10% presentó un comportamiento similar a la de zeolita natural 0,6%.

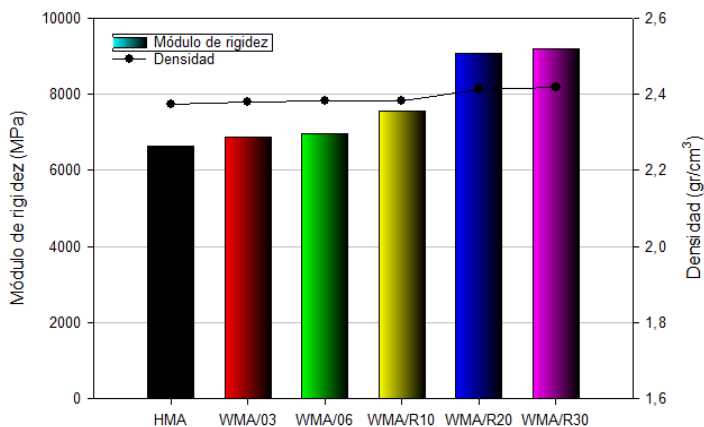


Figura 3 Módulos de rigidez y densidades de las mezclas evaluadas.

Las mezclas semicalientes con adición de zeolita natural de 0,3% y 0,6% registran valores de módulo de rigidez levemente superiores al obtenido por la mezcla patrón de referencia, 3,6% y 5,1%, respectivamente. Resultados similares se observan en estudios realizados en donde existe aumento del módulo de

rigidez al adicionar zeolita natural [17]. En las mezclas semicalientes con tasas de 10%, 20% y 30% de RAP se observan mayores incrementos en el módulo de rigidez con respecto a la mezcla HMA de referencia, con un 14%, 37% y 39%, respectivamente. Estos incrementos en el módulo de rigidez de las mezclas semicalientes con adición de RAP se deben principalmente a que el RAP incorpora un ligante asfáltico envejecido que cuando se mezcla con el ligante nuevo, resulta una ligante combinado de mayor rigidez [18].

La **Figura 4** y la **Tabla 7** muestran las leyes de fatiga obtenidas para la mezcla patrón y las mezclas semicalientes evaluadas. Las mezclas WMA con adición de 0,3% y 0,6% de zeolita natural presentan leyes de fatiga muy similares a la mezcla de referencia, con valores de deformación y pendientes equivalentes. A diferencia de los resultados obtenidos, Sengoz (2017) indica que los aditivos químicos y sintéticos, así como la zeolita natural, influyeron mostrando un aumento en rendimiento en términos de números de ciclo de carga para similar nivel de tensión aplicado en mezclas semicalientes con respecto a una mezcla patrón [5].

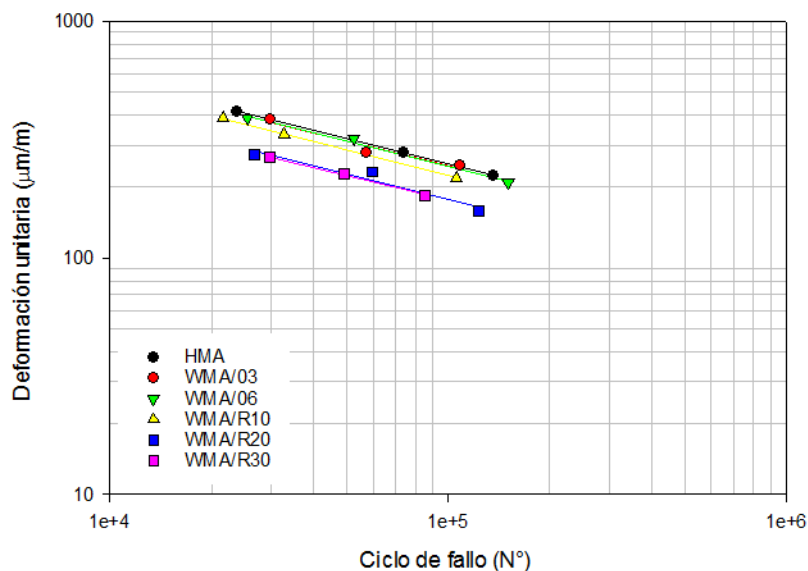


Figura 4 Leyes de fatiga mezclas evaluadas.

Para aquellas mezclas con mayor cantidad de RAP (WMA/R20 y WMA/R30), se registran menores valores de deformación a igual número de ciclos de aplicación de carga. Según estudios anteriores, investigadores como Kim et al. (2017) sugiere que existe una disminución de la vida a fatiga de las mezclas con adición de RAP debido a que ligante envejecido rigidiza la mezcla [18]. Resultado diferente, fue el obtenido por Pasetto y Baldo (2017), en el cual exponen que las mezclas con adición inferior a

40% de RAP (independiente del porcentaje agregado) se caracterizan por una mayor vida a fatiga [9]. En la misma línea, Silva et al. (2012) establecen que una mezcla fabricada con un 100% de RAP presenta mejores resultados a la resistencia por fatiga que una HMA convencional [19]. Por otra parte, la mezcla con adición de 10% de RAP mostró un comportamiento intermedio para el nivel de deformación a igual número de ciclo de carga.

Tabla 7 Valores de parámetros y coeficientes de leyes de fatiga.

Mezcla	$\varepsilon(\mu\text{m/m})$	k_2	$\varepsilon(10^6)(\mu\text{m/m})$	r^2	Módulo Dinámico (MPa)
HMA	15010	-0,356	110	0,999	3677
WMA/03	14069	-0,352	109	0,938	3770
WMA/06	14660	-0,356	107	0,988	3903
WMA/R10	14804	-0,364	97	0,999	4921
WMA/R20	10449	-0,354	79	0,937	5902
WMA/R30	9868	-0,350	78	0,996	6080

A priori, no se puede establecer la durabilidad de una mezcla a fatiga solo por sus valores de la ley de fatiga y módulos, puesto que ésta debe evaluarse como parte de una estructura de

pavimento. En este contexto, la **Figura 5** muestra los resultados del análisis de durabilidad de las mezclas evaluadas en una estructura de pavimento de espesor variable.

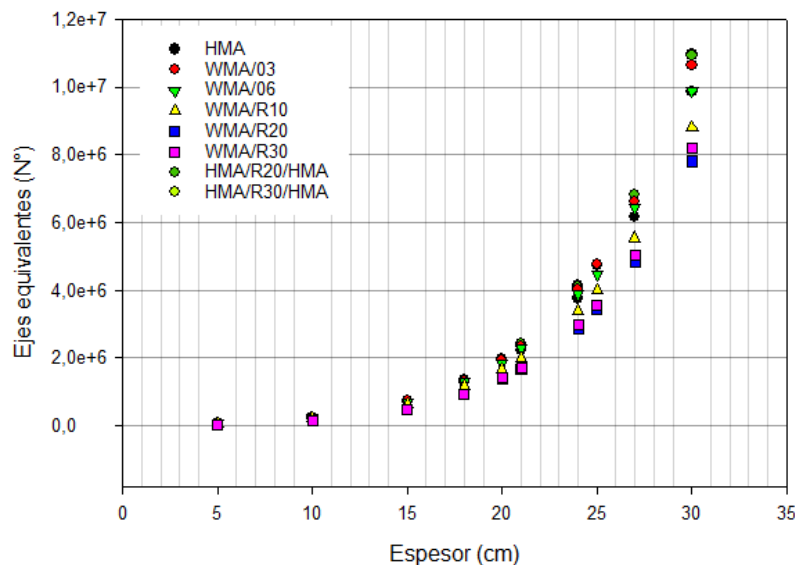


Figura 5 Durabilidad de mezclas evaluadas en estructuras de pavimento de espesor y composición variable.

Las mezclas WMA/03 y WMA/06 mostraron una ligera disminución de durabilidad en los primeros tramos de espesor de pavimento, entre 5 cm y 15 cm, con una disminución máxima de durabilidad de 6% en comparación con la HMA de referencia. Para el tramo de 25 cm, la mezcla WMA/03 presentó un comportamiento similar a la HMA resistiendo la misma cantidad de ejes equivalentes, mientras que WMA/06 mantuvo una disminución constante de 6%. El tramo final evaluado muestra que la mezcla WMA/03 aumenta en 8% la durabilidad, mientras que WMA/06 presenta un comportamiento igual a la de HMA resistiendo la misma cantidad de ejes equivalentes.

Las mezclas semicalientes con mayor incorporación de RAP (WMA/R20 y WMA/R30) presentaron una disminución más pronunciada de durabilidad en los primeros tramos de espesor de pavimento, entre 5 cm – 15 cm, disminuyendo en un rango de 48% a 30%, respectivamente. De manera similar, en los tramos de mayor espesor, entre 25 cm y 30 cm, la durabilidad se reduce en un 23% aproximadamente en comparación con la HMA de referencia. Estos resultados difieren del obtenido por Celauro et al. (2010), quien indica que mediante un proceso innovador en la fabricación se puede obtener mezclas de "alto rendimiento" para capas superficiales de carreteras para altos niveles de tráfico



pesado, en regiones con climas cálidos, utilizando porcentajes altos de materiales reciclados (hasta 50%) [20]. La mezcla WMA/R10 presentó un comportamiento más estable en donde durante todos los tramos de espesor disminuye la durabilidad en un 15% en comparación con la HMA de referencia. Sin embargo, al combinar estas mezclas en una estructura de pavimento con una mezcla patrón la respuesta de la estructura fue diferente. Se evaluaron estructuras combinadas de pavimento HMA - WMA/R30/ - HMA y HMA - WMA/R20/ - HMA. Estas estructuras mostraron un mejor desempeño en los tramos de 15 cm a 30 cm, aumentando la durabilidad del pavimento hasta en un 8% en comparación con estructura compuesta solamente con HMA de referencia. Esto se produce debido a la mayor capacidad estructural que le otorga las mezclas más rígidas en la capa intermedia a la estructura de pavimento analizada, efecto similar al logrado en los pavimentos de larga duración con la utilización de mezclas de alto módulo en la capa intermedia [21].

4. CONCLUSIONES

Las mezclas semicalientes con adición de zeolita natural en 0,3% y 0,6% presentan comportamientos a fatiga muy similares a la mezcla de referencia, al igual que en las propiedades de módulo de rigidez y densidad. Esto implica que al reducir 20 °C la temperatura de fabricación de las mezclas, la durabilidad de éstas es similar a la HMA de referencia.

A medida que las mezclas incorporan mayor cantidad de RAP aumenta la rigidez de las mezclas y su comportamiento a fatiga registra menores deformaciones a igual número de ciclos de carga. Sin embargo, en comparación con la HMA de referencia, las mezclas con mayores contenidos de RAP presentan una menor resistencia a la vida a la fatiga si se utilizan en toda la estructura de capas asfálticas del pavimento. El fenómeno de envejecimiento del ligante adherido al RAP afecta el rendimiento del ligante combinado, especialmente en aquellas mezclas con altos contenidos de RAP. Sin embargo, estas mezclas al tener mayor rigidez proporcionan mayor capacidad estructural al pavimento. Si esto es tomado en consideración, permite aumentar la durabilidad del pavimento si son utilizadas como parte intermedia de la estructura. Este comportamiento sería similar a los pavimentos de larga duración, en los cuales por diseño presentan una capa intermedia que tiene como principal característica ser una mezcla de alto módulo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo es el resultado de las investigaciones realizadas en el marco de los proyectos FONDEF IDEA N° ID15I10235 financiado por CONICYT y el Proyecto DI18-0053 financiado por la Universidad de La Frontera.

6. REFERENCIAS

- [1] European Asphalt Pavement Association and National Asphalt Pavement Association, *The Asphalt Paving Industry A Global Perspective - 2nd edition*. 2011.
- [2] Ministerio de Obras Públicas de Chile. Dirección de Vialidad: Departamento de Gestión Vial, "Red Vial Nacional: Dimensionamiento y características," 2016.
- [3] J. Santos, G. Flintsch, and A. Ferreira, "Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 116, pp. 15–31, 2017.
- [4] A. M. Rodriguez-Alloza, A. Malik, M. Lenzen, and J. Gallego, "Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures," *J. Clean. Prod.*, vol. 90, no. February 2015, pp. 171–182, 2015.
- [5] B. Sengoz, A. Topal, J. Oner, M. Yilmaz, P. A. Dokandari, and B. V. Kok, "Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, pp. 117–127, 2016.
- [6] D. Singh, A. Habal, P. K. Ashish, and A. Kataware, "Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach," *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 949–960, 2018.
- [7] J. V. S. de Melo and G. Trichês, "Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 364–373, 2017.
- [8] I. Isailović, M. P. Wistuba, and A. C. Falchetto, "Experimental study on asphalt mixture recovery," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 4, p. 196, 2017.
- [9] M. Pasetto and N. Baldo, "Unified approach to fatigue study of high performance recycled asphalt concretes," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 2, p. 113, 2017.
- [10] H. Alexander, R. Quintana, O. Ignacio, L. Vergara, W. Darío, and F. Gómez, "Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto Behavior of a warm mix asphalt made in an asphalt plant," *Ing. y Desarro. Univ. del Norte*, vol. 35, no. 1, pp. 152–173, 2017.
- [11] M. J. Valdebenito and M. García, "Diseño Marshall de mezcla semicaliente con adición de Zeolitas Naturales," *Tesis de Titulación. Universidad de La Frontera*. 2016.
- [12] L. Sánchez, "Diseño Marshall de mezcla semicaliente con adición de RAP y de Zeolitas Naturales." *Tesis de Titulación. Universidad de La Frontera*. 2016.
- [13] J. Moreno, *Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Tesis de Titulación. Universidad Politécnica de Cataluña*. 2005.



- [14] AEONOR, UNE-EN 12697-26 Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 26: Rigidez. 2012.
- [15] AEONOR, UNE-EN 12697-26 Mezclas bituminosas. Método de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga. 2008.
- [16] Universidad de Costa Rica, "Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales," 2017. [Online]. Available: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/centro-de-descarga/pitra-pave/descarga-pitra-pave.html>.
- [17] A. Woszuk and W. Franus, "Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 556–563, 2016.
- [18] D. Kim, A. Norouzi, S. Kass, T. Liske, and Y. R. Kim, "Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba," *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 39–50, 2017.
- [19] H. M. R. D. Silva, J. R. M. Oliveira, and C. M. G. Jesus, "Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 60, pp. 38–48, 2012.
- [20] C. Celauro, C. Bernardo, and B. Gabriele, "Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 6, pp. 337–347, 2010.
- [21] D. Newcomb, R. Willis, and D. Timm, "Perpetual Asphalt Pavements," vol. 49, pp. 1–45, 2004.



Elementos de Reemplazo de Tuberías para el Análisis del Flujo Transitorio en Redes de Tuberías. Pipe Replacement Elements for Unsteady Flow Analysis in Pipe Networks.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido

19-06-2018

Aceptado

10-09-2018

Publicado

08-11-2018

Palabras Clave:

Diferencias finitas

Elemento de inercia
concentrada

Elemento de reemplazo
de tuberías (ERT)

Flujo transitorio

Método de las
características

Article history:

Received

19-06-2018

Accepted

10-09-2018

Available

08-11-2018

Keywords:

Finite-differences

Lumped inertia element

Pipe replacement
element (PRE)

Transient flow

Method of
characteristics

Resumen

Los elementos de reemplazo de tuberías (ERTs) son un enfoque útil en el análisis de flujo transitorio en redes de tuberías complejas que contienen tuberías muy cortas que restringen el paso de tiempo computacional en la etapa de discretización. A menudo es necesario reemplazar estos elementos relativamente cortos por una representación matemática que permita remodelar la discretización del dominio, lo que permite utilizar un paso de tiempo mayor, reduciendo así el uso de recursos computacionales. En este artículo se analizan dos enfoques ERT, uno basado en el concepto del elemento de inercia concentrado, y el otro en diferencias finitas explícitas. El enfoque ERT es una herramienta útil que permite reducir el impacto de los tubos cortos en la modelación del flujo transitorio.

Abstract

Pipe replacement elements (PREs) are a useful approach in transient flow analysis in complex pipe networks containing very short pipelines therefore restricting the computational time step in the discretization stage. It is often necessary to replace these relatively short elements by a mathematical representation that allow to reshape the domain discretization, which allows to use larger time step, thus reducing the use of computational resources. In this article two PRE approaches are analysed, one based on the lumped inertia element concept, and the other on explicit finite-differences. PRE approach is a useful tool that allows reducing the impact of short pipes in transient flow modelling.

J. Twyman¹

¹Twyman Ingenieros Consultores, Rancagua, Chile.
john@twyman.cl, teléfono: +56-9-89044770.

1. Introducción

Al analizar el flujo transitorio en redes de tuberías complejas, definidas como un conjunto de tuberías presurizadas conectadas entre sí en forma arbitraria, es necesario aplicar las condiciones de borde en la unión de dos o más tuberías con el requisito de que la magnitud del paso de tiempo (Δt) sea común a todas las tuberías [6], lo cual dificulta la obtención de un número entero de sub-tramos en cada tubería N [4]. Para tratar este problema de discretización, un camino de solución es ajustar la magnitud de la velocidad de la onda forzando un número entero de sub-tramos; aplicar un esquema de interpolación entre los puntos de la malla espacio-tiempo permitiendo así que N tenga un valor no entero [3]; o implementar esquemas de solución menos propensos al efecto del número de Courant o de la relación entre Δx (longitud del sub-tramo) y Δt mediante el uso de estrategias de tipo adaptativo [16, 17]. Dado que el método de las características requiere que cada tubería tenga al menos un sub-tramo ($N = 1$), el paso de tiempo requerido para representar con exactitud a las tuberías más cortas puede ser antieconómico [4]. Por lo tanto, es deseable reemplazar estos tubos cortos por representaciones matemáticas aproximadas que permitan usar un paso de tiempo de magnitud mayor. Tal condición de borde se conoce como pipe replacement element [4] (o PRE, en inglés) o como elemento de reemplazo de tubería (o ERT, en español). A continuación, se describirán dos técnicas ERT útiles para modelar los conductos cortos: el primero en el concepto de elemento de inercia concentrada y el segundo basado en un nuevo enfoque explícito basado en diferencias finitas.

2. Material y métodos

2.1 Ecuaciones que gobiernan el flujo transitorio

Las ecuaciones que gobiernan el flujo transitorio en las tuberías pueden ser descritas completamente mediante un sistema de ecuaciones diferenciales parciales compuesto por dos ecuaciones. Cuando en una sección de tubería se considera un volumen de control infinitamente corto, tal sistema puede ser representado como [2]:

$$\frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2)$$

Donde (1) y (2) corresponden a las ecuaciones de la continuidad y de la dinámica (o momento), respectivamente. Además, $\partial =$

derivada parcial, H = cota piezométrica (m), a = velocidad de la onda (m/s), g = constante de gravedad (m/s^2), A = área de la sección transversal de la tubería (m^2), Q = caudal (m^3/s), f = factor de fricción (Darcy-Weisbach) y D = diámetro interno de la tubería (m). Los subíndices x y t denotan las dimensiones espacial y temporal, respectivamente. Las ecuaciones (1) y (2) toman en cuenta las siguientes suposiciones [10]: (a) el flujo es unidimensional, (b) la tubería está llena de agua durante el transitorio, (c) no se genera el fenómeno de separación de la columna de agua durante el transitorio, (d) tanto la pared de la tubería como el fluido tienen un comportamiento linealmente elástico, y (e) la pérdida de presión por fricción puede ser aproximada como si se tratara de un flujo permanente. Las ecuaciones (1) y (2), junto con las ecuaciones relacionadas con condiciones de borde específicas, permiten describir el fenómeno de propagación de las ondas debido a un evento de golpe de ariete. Sin embargo, al no existir una solución analítica, dichas ecuaciones deben ser resueltas numéricamente con la asistencia del computador [9].

2.2 Velocidad de la onda

La velocidad de la onda puede definirse como [12, 13, 15, 18]:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + [(K/E)(D/e)]c_1} \quad (3)$$

Con K = módulo de compresibilidad del agua (Pa); ρ = densidad del agua (Kg/m^3); e = espesor de la pared de la tubería (m); E = módulo de elasticidad de la tubería (Pa), c_1 = factor relacionado con la condición de apoyo de la tubería (adimensional), generalmente igual a $1-u^2$ que corresponde a una tubería anclada en ambos extremos e imposibilitada de moverse longitudinalmente al paso de las ondas de presión [1]. El factor u , conocido como módulo de Poisson (adimensional), corresponde a un valor relacionado con el material constituyente de la tubería.

2.3 Elemento de reemplazo de tubería (ERT)

Algunos autores [4, 5] proponen reemplazar los tubos cortos por expresiones matemáticas que permitan obtener un Δt mayor sin modificar la estabilidad óptima del MC o de sus condiciones de convergencia. Por "corta" se entiende una tubería donde la relación entre su longitud (L) y su velocidad de onda (a) es pequeña en relación con el paso de tiempo utilizado en el análisis [4]. La condición de borde de dos nodos, conocida como ERT, puede ser representada a través del concepto de elemento de inercia concentrada ERT-EIC (Figura 1), o alternativamente mediante el uso de diferencias finitas o ERT-DF (Figura 2).

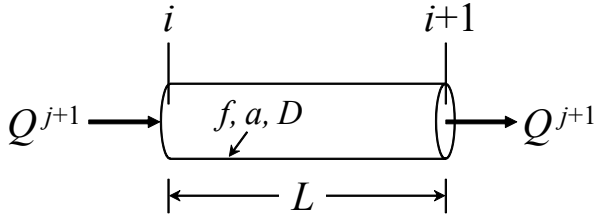


Figura 1 PRE-EIC.

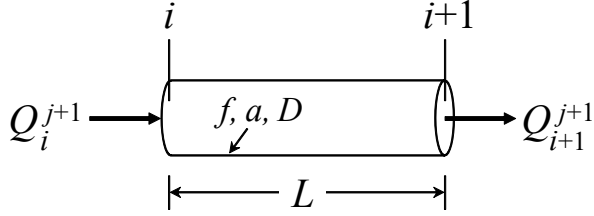


Figura 2 PRE-DF.

2.4 ERT: elemento de inercia concentrada (EIC)

Se puede decir que ERT-EIC consiste en la sustitución de una tubería corta por una ficticia en la que se supone que el flujo entre los nodos i e $i + 1$ es incompresible y puede ser representado por una única variable conocida como Q^{j+1} [4, 7]. Si se cumple esta condición, entonces:

$$H_{P(i)} - H_{P(i+1)} = C_1 + B_1 \cdot Q^{j+1} \quad (4)$$

Con:

$$H_{P(i)} = C_{c(i)} - B_{c(i)} \cdot Q^{j+1} \quad (5)$$

$$H_{P(i+1)} = C_{c(i+1)} + B_{c(i+1)} \cdot Q^{j+1} \quad (6)$$

Reemplazando (5) y (6) en (4) y resolviendo se obtiene:

$$Q^{j+1} = \frac{C - C_1}{B + B_1} \quad (7)$$

Con:

$$C = C_{c(i)} - C_{c(i+1)} \quad (8)$$

$$C_1 = H_{i+1}^j - H_i^j - \frac{2LQ^j}{gA\Delta t} \quad (9)$$

$$B = B_{c(i+1)} + B_{c(i)} \quad (10)$$

$$B_1 = \frac{2L}{gA\Delta t} + \frac{fL|Q^j|}{gDA^2} \quad (11)$$

Siendo L = longitud de la tubería reemplazada (m), A = área de la sección transversal de la tubería (m^2), f = factor de fricción (Darcy), adimensional, H_i^j y H_{i+1}^j = presiones en las secciones i e $i + 1$, respectivamente, en m. Además, $B_{c(i)} = B_{c(i+1)} = a/gA$ (en las secciones i e $i + 1$, respectivamente), en s/m^2 . Debido a que el ERT es una condición de borde de dos nodos, una vez conocido Q^{j+1} es posible calcular las presiones en las secciones de borde i e $i + 1$ a partir de las ecuaciones (5) y (6). La principal desventaja del enfoque ERT-EIC es que supone que el fluido es incompresible, lo cual significa que la onda se transmite instantáneamente a través de la tubería reemplazada. También supone que no existe almacenamiento de agua en la tubería reemplazada [4]. Todas estas simplificaciones reducen el campo de aplicación del enfoque ERT-EIC, siendo conveniente considerar otras alternativas de solución como aquellas basadas en la representación del ERT en base a diferencias finitas.

2.5 ERT: diferencias finitas (DF)

Se presenta una nueva versión para reemplazar las tuberías cortas por ERTs donde se supone que algunas tuberías de la red pueden ser reemplazadas por aproximaciones basadas en diferencias finitas, trabajando la tubería reemplazada como si fuera una condición de borde de dos nodos (Figura 2). En este caso en particular, y según el método de diferencias finitas implícito (MDFI), las ecuaciones de la dinámica y de la continuidad pueden ser representadas de la siguiente forma [14]:

$$d_1 Q_i^{j+1} + d_2 Q_{i+1}^{j+1} - d_3 H_i^{j+1} + d_3 H_{i+1}^{j+1} = -d_4 \quad (12)$$

$$-c_1 Q_i^{j+1} + c_1 Q_{i+1}^{j+1} + c_2 H_i^{j+1} + c_3 H_{i+1}^{j+1} = -c_4 \quad (13)$$

Donde $d_1, d_2, d_3, d_4, c_1, c_2, c_3$ y c_4 son constantes conocidas que dependen principalmente de las variables de estado en el paso de tiempo anterior, de los parámetros de discretización ($\Delta x, \Delta t$), y de los coeficientes de ponderación del MDFI [14]. Por otro lado, a partir de la Figura 2 se tiene:

$$H_i^{j+1} = C_{c(i)} - B_{c(i)} \cdot Q_i^{j+1} \quad (14)$$

$$H_{i+1}^{j+1} = C_{c(i)} + B_{c(i)} \cdot Q_{i+1}^{j+1} \quad (15)$$

Con H_i^{j+1} and H_{i+1}^{j+1} = presión en el instante de tiempo previo en las secciones de tubería i e $i + 1$, respectivamente, en m, Q_i^{j+1} y Q_{i+1}^{j+1} = caudal en el instante de tiempo previo en las secciones i e $i + 1$, respectivamente, en m³/s. Reemplazando las ecuaciones (14) y (15) en las ecuaciones (12) y (13), haciendo un trabajo algebraico y simplificando se obtienen las siguientes expresiones:

$$Q_i^{j+1} = \frac{E_2 E_6 - E_3 E_5}{E_2 E_4 - E_1 E_5} \quad (16)$$

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{E_3 - E_1 Q_i^{j+1}}{E_2} \quad (17)$$

Donde:

$$E_1 = d_1 + d_3 \cdot B_{c(i)} \quad (18)$$

$$E_2 = d_2 + d_3 \cdot B_{c(i+1)} \quad (19)$$

$$E_3 = -d_4 + d_3 \cdot C_{c(i)} - d_3 C_{c(i+1)} \quad (20)$$

$$E_4 = -c_1 - c_2 \cdot B_{c(i)} \quad (21)$$

$$E_5 = c_1 + c_3 \cdot B_{c(i+1)} \quad (22)$$

$$E_6 = -c_4 - c_2 \cdot C_{c(i)} - c_3 \cdot C_{c(i+1)} \quad (23)$$

Finalmente, conocidos Q_i^{j+1} y Q_{i+1}^{j+1} es posible calcular las presiones a partir de las ecuaciones (16) y (17) aplicadas en las ecuaciones (14) y (15). Como puede apreciarse, la aplicación del enfoque ERT-DF permite obtener una solución totalmente explícita. El enfoque ERT-DF tiene varias ventajas en relación al enfoque ERT-EIC [4]: (a) toma en cuenta el movimiento de la onda a través de la tubería reemplazada, (b) incluye el efecto de almacenamiento de agua, y (c) considera el caudal con inercia y fricción de la tubería reemplazada. El enfoque ERT puede ser también aplicado como parte de un disipador de energía externo [5, 11], para modelar diferentes tipos de válvulas [7] o como elemento que permite mejorar el desempeño del MC [11].

3. Resultados

3.1 Ejemplo de aplicación 1

La red de tuberías (**Figura 3**) consiste en un estanque ($H_0 = 150$ m), una tubería y una válvula que cierra en $T_c = 2,1$ s [18]. La curva de cierre de la válvula está dada por la ecuación $\tau = (1 - t/T_c)^{1,5}$, donde τ = relación de apertura de la válvula y t = tiempo. La tubería original fue dividida en tres partes permitiendo así la posibilidad de aplicar los enfoques ERT-EIC y ERT-DF sobre la tubería de menor longitud relativa. La forma de discretización de las tuberías y los datos de los nodos se muestra en las **Tablas 1** y **2**, respectivamente, donde N es igual a 21, 3 y 21 para las tuberías 1, 2 y 3, respectivamente, con $\Delta t = 0,01111$ (s) y $C_n = 1,0$ para todas las tuberías.

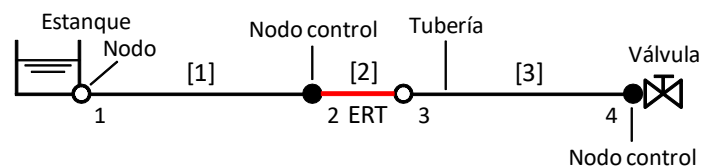


Figura 3 Red ejemplo. ERT en línea de color rojo (adaptado de Wylie y Streeter [18]).

Tabla 1 Discretización de la red.

Tubería número	D (m)	L (m)	Q_0 (m ³ /s)	f	a (m/s)
[1]	0,50	280	0,477	0,018	1.200
[2] ERT	0,50	40	0,477	0,018	1.200
[3]	0,50	280	0,477	0,018	1.200

Tabla 2 Datos de los nodos.

Nodo número	H_0 (m)	Elevación z (m)
1	150,00	0
2	146,99	0
3	146,56	0
4	143,55	0

Las **Figuras 4** y **5** muestran una comparación entre el resultado exacto y el resultado que se obtiene en los nodos 2 y 4 (válvula), respectivamente, cuando el tramo más corto del sistema es reemplazado por un ERT-EIC y ERT-DF. En el primer caso se tiene que la magnitud del primer pico de presión es muy cercano al caso exacto en los nodos 2 y 4 (válvula), aún cuando el resultado obtenido por el ERT-EIC se torna relativamente insatisfactorio debido a que muestra un leve desplazamiento y atenuación respecto de la solución exacta, transcurridos 2,5 (s) del tiempo de simulación. Por otro lado, al reemplazar la tubería 2 por un ERT-

DF se verifica la obtención de una curva de presión vs tiempo sin la aparición de desplazamientos o atenuaciones respecto de la curva exacta. La técnica ERT permite adoptar un nuevo arreglo de discretización al dejar fuera del cálculo de Δt y N a la tubería 2. En el sistema con ERT, los nuevos valores para Δt y N total son 0,078 (s) y 6, respectivamente ($N = 3$ para las tuberías 1 y 3). La **Tabla 3** muestra las presiones extremas registradas en cada escenario de simulación.

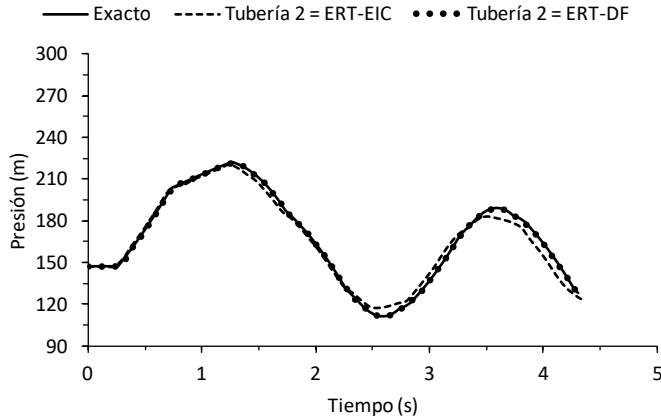


Figura 4 Presión vs tiempo en el nodo 2.

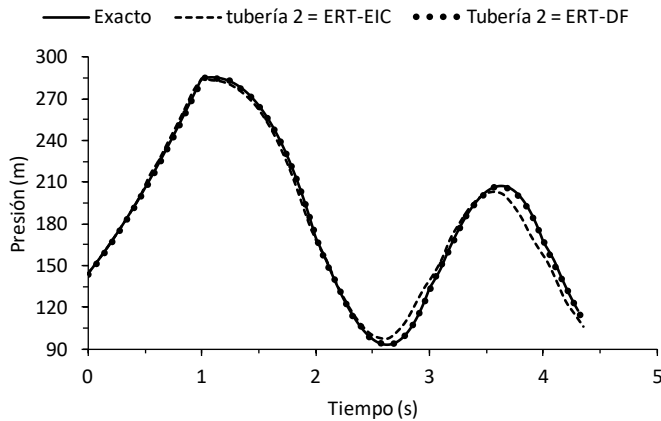


Figura 5 Presión vs tiempo en el nodo 4 (válvula).

Tabla 3 Presiones extremas P (ejemplo 1).

Sistema	P Máxima (m)	t (s)	P Mínima (m)	t (s)
Sin ERT	285,1	1,1	92,8	2,6
Con ERT-EIC	283,8	1,0	97,3	2,6
Con ERT-DF	286,6	1,1	92,8	2,6

Esto permite reducir la cantidad de cálculos en cada paso de tiempo, además de disminuir el tiempo de ejecución desde 1,4 s (exacto) a sólo 0,05 s (sistema con ERT-EIC y ERT-DF). Tanto este ejemplo como el siguiente fueron corridos en un computador PC estándar de 32 bits con 1,66 (GHz) de velocidad de procesamiento.

3.2 Ejemplo de aplicación 2

La red a analizar (**Figura 6**) se compone de un estanque ($H_0 = 70$ m), 27 tuberías, 23 nodos y una válvula que cierra en 5 (s). Todos los nodos tienen una elevación igual a 0 (m). Las **Tablas 4 y 5** muestran los datos de las tuberías y nodos, respectivamente.

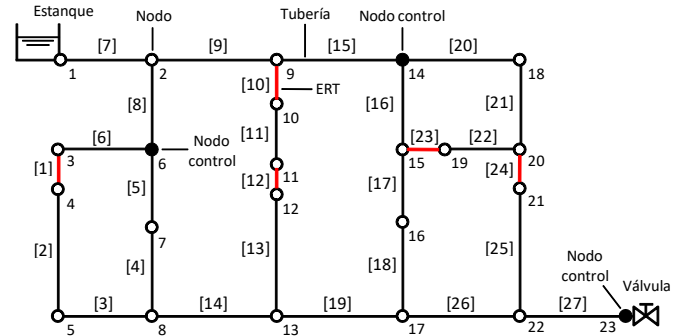


Figura 6 Red ejemplo (ERTs en líneas de color rojo).

Tabla 4 Datos de las tuberías.

Tubería número	D (m)	L (m)	Q_0 (m³/s)	f	a (m/s)
[1] ERT	0,20	30	0,01120	0,021	1.200
[2]	0,20	140	0,01120	0,021	1.200
[3]	0,20	140	0,01120	0,021	1.200
[4]	0,20	100	0,01887	0,020	1.200
[5]	0,20	70	0,01887	0,020	1.200
[6]	0,20	140	0,01120	0,021	1.200
[7]	0,20	140	0,07500	0,018	1.200
[8]	0,20	120	0,03007	0,019	1.200
[9]	0,20	140	0,04493	0,018	1.200
[10] ERT	0,20	30	0,00864	0,022	1.200
[11]	0,20	115	0,00864	0,022	1.200
[12] ERT	0,20	30	0,00864	0,022	1.200
[13]	0,20	115	0,00864	0,022	1.200
[14]	0,20	140	0,03007	0,019	1.200
[15]	0,20	120	0,03628	0,019	1.200
[16]	0,20	120	0,01878	0,020	1.200

Tabla 4 (cont.) Datos de las tuberías.

Tubería número	D (m)	L (m)	Q_0 (m ³ /s)	f	a (m/s)
[17]	0,20	85	0,00245	0,029	1.200
[18]	0,20	85	0,00245	0,029	1.200
[19]	0,20	120	0,03872	0,019	1.200
[20]	0,20	140	0,01750	0,020	1.200
[21]	0,20	120	0,01750	0,020	1.200
[22]	0,20	110	0,01633	0,020	1.200
[23] ERT	0,20	30	0,01633	0,020	1.200
[24] ERT	0,20	30	0,03383	0,019	1.200
[25]	0,20	140	0,03383	0,019	1.200
[26]	0,20	140	0,03117	0,019	1.200
[27]	0,20	140	0,07500	0,018	1.200

El estado inicial de flujo permanente fue calculado usando el programa EPANET [8]. Las **Figuras 7, 8 y 9** muestran las curvas de presión vs tiempo en los nodos 6, 14 y 23 (válvula) cuando el flujo transitorio es resuelto mediante el MC con $C_n = 1,0$ en todas las tuberías (resultado exacto) y mediante el MC cuando las tuberías 1, 10, 12, 23 y 24 son reemplazadas por ERTs basados en los enfoques EIC y DF.

Tabla 5 Datos de los nodos.

Nodo número	H_0 (m)	Nodo número	H_0 (m)
1	70,00	13	64,91
2	66,37	14	64,27
3	65,74	15	64,05
4	65,72	16	64,04
5	65,63	17	64,04
6	65,84	18	64,04
7	65,71	19	64,01
8	65,53	20	63,85
9	65,03	21	63,69
10	65,02	22	62,91
11	64,97	23	59,28
12	64,96	---	---

Tal como se verificó en el ejemplo anterior, el resultado obtenido al reemplazar algunas tuberías por ERT-EIC muestra curvas de

presión vs tiempo donde los tres primeros picos de presión son muy cercanos a los picos exactos, pese a que pasados 10 (s) del tiempo de simulación estos pasan a mostrar un leve desplazamiento de sus curvas respecto de la curva exacta (ver **Figuras 7, 8 y 9**). En contraste, el reemplazo de las tuberías cortas por un ERT-DF permitió conseguir un resultado cercano al exacto, sin atenuaciones ni desplazamiento de las curvas respecto de la curva exacta. Además, el uso de ERTs permitió reducir la cantidad total de sub-tramos (N total), la cual pasó desde 285 (resultado exacto) a 117 (resultado con ERT-EIC y ERT-DF).

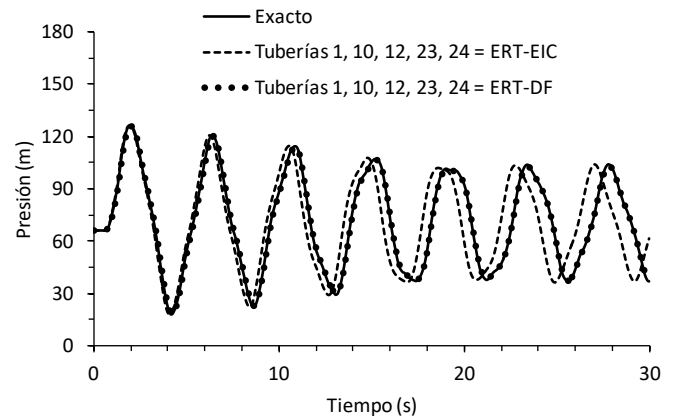


Figura 7 Curvas de presión vs tiempo en el nodo 6.

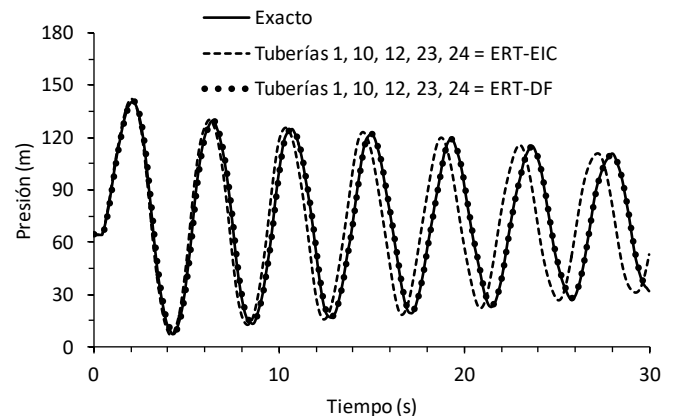


Figura 8 Curvas de presión vs tiempo en el nodo 14.

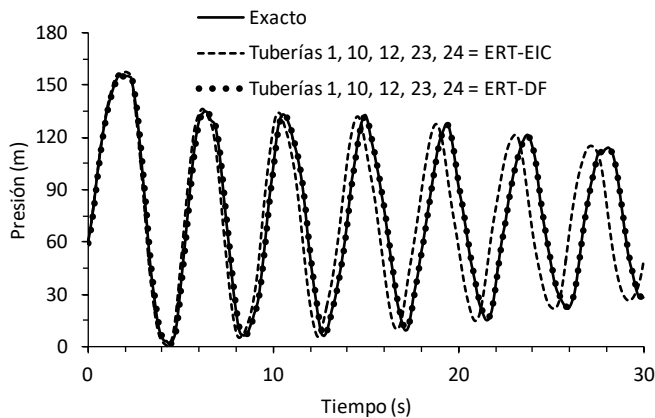


Figura 9 Curvas de presión vs tiempo en la válvula.

La **Tabla 6** muestra las presiones extremas registradas en cada escenario de simulación. El uso de los ERTs permitió incrementar la magnitud del paso de tiempo, la cual ahora es calculada a partir de las tuberías con mayor longitud relativa, pasando de $\Delta t = 0,008$ s (resultado exacto, sin ERTs) a $\Delta t = 0,019$ s (resultado con ERTs). Esta menor cantidad de N y mayor valor de Δt hizo que el tiempo de ejecución disminuyera significativamente, de 104,4 s (resultado exacto, sin ERTs) a 29,3 s (tramos reemplazados con ERT-EIC) y a 30,2 s (tramos reemplazados con ERT-DF).

Tabla 6 Presiones extremas P (ejemplo 2).

Sistema	P Máxima (m)	t (s)	P Mínima P (m)	t (s)
Sin ERT	155,4	2,2	1,5	4,4
Con ERT-EIC	157,7	2,1	0,6	4,3
Con ERT-DF	155,4	2,1	1,7	4,4

4. Conclusiones

Se concluye que los ERTs permiten acceder a mayores Δt 's al permitir que la discretización espacio-temporal, basada en una cuadrícula rectangular tradicional, pueda ser implementada dejando de lado aquellas tuberías de menor longitud relativa. El enfoque original basado en el ERT-DF es el que muestra un mejor desempeño numérico, siendo muy fácil de programar e implementar en el código del programa de golpe de ariete, ya que prácticamente consiste en resolver un sistema de ecuaciones explícito de tamaño 2X2 (ecuaciones 16 y 17). El enfoque ERT-DF puede ser aplicado sin problemas en redes simples o complejas, sin que la conectividad entre tramos y nodos constituya un impedimento, y tampoco la cantidad de tramos que puedan estar conectados a un nodo cualquiera. Dadas las características

numéricas del ERT-DF, este podría ser utilizado no solo para reemplazar a las tuberías cortas, sino que también para reemplazar aquellas tuberías donde el número de Courant es menor que 1,0, reduciendo con esto el efecto de atenuación numérica. El ERT-DF también podría ser utilizado para reemplazar los sub-tramos internos en aquellas tuberías donde $C_n < 1,0$. Esto requeriría re-discretizar la tubería usando $(N - 1)$ sub-tramos con $C_n = 1,0$ ($\Delta x = a \cdot \Delta t$) aptos de ser resueltos mediante el MC. Los sub-tramos restantes, de longitud igual a $\Delta x^* = L - [N - 1] \cdot \Delta x$, pueden ser resueltos aplicando el ERT-DF mostrado en este artículo. Finalmente, un aspecto a mejorar en el algoritmo ERT se refiere a la posibilidad de reemplazar una o más tuberías cortas conectadas mediante un nodo común. Esto debido a que el algoritmo actual sólo permite reemplazar tuberías cortas conectadas a estanques u otros elementos de almacenamiento tales como los disipadores de energía externos (sigla en Inglés: EED), o reemplazar tuberías cortas aisladas ubicadas en diferentes partes de la red sin algún nodo de unión común con otras tuberías cortas.

5. Referencias

- [1] Chaudhry M.H. (1979). Applied hydraulic transients, p. 266. New York: Van Nostrand Reinhold. * p. 36.
- [2] Chaudhry M.H. (1982). Numerical solution of transient-flow equations. Proceedings Speciality Conference Hydraulics Division (pp. 633-656). Jackson: ASCE.
- [3] Ghidaoui M.S., Karney B.W., McInnis D.A. (1998). Energy estimates for discretization errors in waterhammer problems. Journal of Hydraulic Engineering, 124(4): 384-393.
- [4] Karney B.W. (1984). Analysis of fluids transients in large distribution networks. PhD. Thesis. Vancouver: University of British Columbia. <http://hdl.handle.net/2429/25312>
- [5] Karney B.W., McInnis D. (1992). Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks. Journal of Hydraulic Engineering, 118(7): 1014-1030.
- [6] Karney B.W., Ghidaoui M.S. (1997). Flexible discretization algorithm for fixed-grid MOC in pipelines. Journal of Hydraulic Engineering, 123(11): 1004-1011.
- [7] McInnis D. A., Karney B.W., Axworthy D.H. (1997). Efficient valve representation in fixed-grid characteristics method. Journal of Hydraulic Engineering, 123(8): 709-718.
- [8] Rossman L.A. (1993). User's manual for EPANET. Drinking Water Resources Division. Cincinnati: USEPA.
- [9] Salgado R., Twyman C., Twyman J. (1992, 8-12 Septiembre). Desarrollo de un algoritmo híbrido para el análisis del escurrimiento impermanente rápido en redes de tuberías a presión. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica (pp. 483-493). Cartagena: IAHR.



- [10] Simpson A.R., Wu Z.Y. (1997). Computer modelling of hydraulic transients in pipe networks and the associated design criteria. International Congress on Modelling and Simulations, Modelling and Simulations Society of Australia. Hobart: MODSIM.
- [11] Twyman J., Twyman C., Salgado R. (1997, 22-24 Octubre). Optimización del método de las características para el análisis del golpe de ariete en redes de tuberías. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica (pp. 53-62). Santiago: Universidad de Santiago USACH.
- [12] Twyman J. (2016a). Wave speed calculation for water hammer analysis. Obras y Proyectos, UCSC. 20: 86-92. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200007>
- [13] Twyman J. (2016b, 26-30 Septiembre). Golpe de Ariete en una Red de Distribución de Agua. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (pp. 10). Lima: IAHR (Spain Water and IWHR China).
- [14] Twyman J. (2017c). Métodos para el análisis del flujo transiente en redes de tuberías, p. 137. Beau Bassin: Editorial Académica Española. p* 53.
- [15] Wan W., Mao X. (2016). Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement. Shock and Vibration, Volume 2016 (2016). Article ID 8705031. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8705031>
- [16] Wan W., Huang W. (2018). Water hammer simulation of a series pipe system using the MacCormack time marching scheme. Acta Mechanica, 229(7): 3143-3160.
- [17] Wang P., Yu B., Han D., Li J., Sun D., Xiang Y., Wang L. (2018). Adaptive implicit finite difference method for natural gas pipeline transient flow. Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP Energies nouvelles, 73(21): 1-11.
- [18] Wylie E.B., Streeter V.L. (1978). Fluid transients, p. 206. New York: McGraw-Hill. Int. Book Co. * p. 38-41.



A Pressure-Sensitive Approach for Transient Analysis of Uniformly Distributed Demands.

Un Enfoque Sensible a la Presión para el Análisis Transitorio de Demandas Uniformemente Distribuidas.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Article history:

Received
13-01-2018
Accepted
19-03-2018
Available
08-11-2018

Keywords:
Method of
characteristics
Newton-Raphson
Pressure-insensitive
demand
Pressure-sensitive
demand
Transient flow

Historial del artículo:

Recibido
13-01-2018
Aceptado
19-03-2018
Publicado
08-11-2018

Palabras Clave:
Método de las
Características
Newton-Raphson
Demanda insensible
a la presión
Demanda sensible a
la presión
Flujo transiente

J. Twyman¹

¹ Twyman Ingenieros Consultores, Rancagua, Chile.
john@twyman.cl, teléfono: +56-9-89044770.

Abstract

In the modelling of water distribution systems is common to assume that water demands are located at the junctions, with a constant and previously known value. This assumption allows simplify the mathematical analysis of the problem, even though in cases of transient flow is more suitable to model the water demand assuming that it has a magnitude which is pressure-sensitive. In this article an original pressure-sensitive approach valid to calculate the transient flow condition in a pipe with uniformly distributed demands is presented. The general conclusion is that the approach based on the pressure-sensitive demand, compared with the usual method of the pressure-insensitive demand, shows significant attenuation in pressure which may condition the design and/or operating procedure of some devices such as valves or air chambers.

Resumen

En la modelación de los sistemas de distribución de agua es común suponer que las demandas de agua se ubican en los nodos donde se unen las tuberías, con un valor constante y previamente conocido. Esta hipótesis permite simplificar el análisis matemático del problema, pese a que en los casos de flujo transitorio es más adecuado modelar la demanda de agua suponiendo que tiene una magnitud sensible a la presión. En este artículo se presenta un enfoque original sensible a la presión, que es válido para calcular la condición de flujo transitorio en una tubería con demandas uniformemente distribuidas. La conclusión general es que el enfoque basado en la demanda sensible a la presión, en comparación con el método usual de la demanda insensible a la presión, muestra una atenuación significativa en la presión que puede condicionar el diseño y/o el funcionamiento de algunos dispositivos tales como válvulas o estanques hidroneumáticos.

1. Introduction.

Typically, water modeling programs assume that all demands are volume-based, and maintain the user-input demand regardless of the calculated available pressure. Although this assumption works well under the normal range of pressure conditions, it loses accuracy if an episode such as a fire or pump outage causes a significant decrease in system pressure. In this context, the assumption that all demands are fully satisfied regardless of the system pressure becomes unreasonable and represents the main limitation of the conventional demand driven analysis (DDA) approach to water distribution systems (WDS) modeling [14], being the pressure dependent analysis (PDA) superior to DDA [15], especially when conventional approach of DDA analysis cannot accurately predict the WDS behavior under pressure deficient conditions. In abnormal operating conditions, WDS may be pressure deficient and thus unable to satisfy demands in full. In such circumstances, PDA models are suitable to quantify the shortfall in flow and pressure accurately for crucial decision-making. Such scenarios cannot be simulated satisfactorily with the conventional DDA models as they do not consider the relationship between nodal flows and the available pressure [13]. There are a number of networks (irrigation, water supply networks, etc.) which do not follow some assumptions such as that water withdrawal takes place at the junctions, with fixed and known values. According to Salgado et al. [12], the first assumption is aimed at simplifying the mathematical solution of the problem, while the second has been a not always suitable standard practice since it is well known that consumption is pressure-dependent. Industrial applications, such as fire protection systems, mining heap leaching, all of them based on sprinklers that also deliver water in an amount that is pressure-dependent. In irrigation systems with sprinklers, drippers or porous devices (pots, strips), water is released in a pressure-dependent fashion; clearly in such systems the pressure-discharge relationship cannot be ignored. In water supply networks, problems such as leakage modeling and extended period simulation are also pressure-dependent. As a matter of fact most of the network operators do know that if they reduce the pressure in the distribution system the total water consumption outflow will be reduced. This leads to the standard practice of reducing night pressures in order to control system leakages. Some of available water hammer software lacks of pressure-dependent demand function to calculate the pressures within a water system, this situation could produce invalid results for certain water systems [2]. Because of the pressure-insensitive demand assumption is intrinsically inaccurate and tends to overdesign surge protection devices, in the following paragraphs a novel simple and useful algorithm for modeling the pressure-sensitive demand located in junctions using the standard MOC is presented, which allows represent the effect of pressure changes

and produce more accurate transient results.

2. Material and methods

2.1 Basic equations of the transient flow

When analyzing a volume control, is possible to obtain a set of non-linear partial differential equations of hyperbolic type valid for describing the one-dimensional transient flow in pipes with circular cross-sectional area [3, 24]:

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2)$$

Where: (1) and (2) correspond to continuity and momentum (dynamics) equations, respectively. Besides, ∂ = partial derivative, H = hydraulic grade-line elevation, a = wave speed, g = gravity constant, A = pipe cross-sectional area, Q = fluid flow, f = friction factor (Darcy-Weisbach) and D = inner pipe diameter. The subscripts x and t denote spatial and time dimension, respectively. Equations (1) and (2), in conjunction with the equations related with the boundary conditions of specific devices, describe the phenomenon of wave propagation for a water hammer event.

2.2 Wave speed

The more general equation to calculate the wave speed in fluids without air is [16, 22-23]:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + [(K/E)(D/e)]c_1} \quad (3)$$

With: K = bulk modulus of the water; ρ = water density; e = pipe wall thickness; K = volumetric compressibility modulus of water; E = elasticity modulus of the pipe; c_1 = factor related with the pipe support condition, generally equal to $1-u^2$ (u = Poisson ratio of the wall material), which corresponds to pipeline anchored against longitudinal movement [23].

2.3 Method of Characteristics (MOC)

MOC is very used for solving equations that govern the transient flow because it works with a constant wave speed and, unlike other methodologies based on finite difference or finite element, it can easily model wave fronts generated by very fast transient flows. MOC works converting the computational space (x) - time

(t) grid (or rectangular mesh) in accordance with the Courant condition. It is useful for modelling the wave propagation phenomena in WDS due to its facility for introducing the hydraulic behavior of different devices and boundary conditions (valves, pumps, reservoirs, etc.). According to Karney [7] and Karney and McInnis [8], the Method of Characteristics proceeds by combining the dynamic and continuity equations together with unknown multiplier. Suitable chosen values of this multiplier allows the partial differential terms to be combined together and replaced by total differentials. When using the simplified governing equations the result of this process is:

$$\frac{dH}{dt} \pm \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{afQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (4)$$

With the associated equation ($Q/A \ll a$):

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (5)$$

The two equations associated with the positive value are usually termed the C^+ equations and the remaining two relations associated with the negative value are called the C^- equations (**Figure 1**). The head and flow values are known at time t and it is desired to know this values at time $t + \Delta t$. A typical such point is P , with unknowns H_P and Q_P .

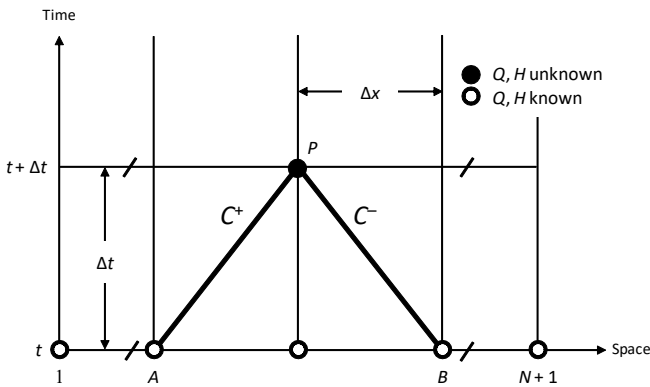


Figure 1 $x - t$ plane with Characteristics grid (adapted from [8]).

The ratio of Δx to Δt is chosen so the associated relation $dx/dt = a$ is satisfied between A and P , and $dx/dt = -a$ is satisfied between B and P . Next, equation (4) is integrated between A and P for the C^+ equation and between B and P for the C^- equation. The difficulty in this integration lies solely in the friction term, since the other terms can be evaluated exactly. The discharge in the friction term is usually simply evaluated at A or B where its value is known, which result in a first-order difference solution to equations (4) and (5). Following the notation of Wylie and

Streeter [23] the procedure can be written in the following form:

$$C^+: H_P = C_P - \frac{a}{gA} Q_P \quad (6)$$

$$C^-: H_P = C_M + \frac{a}{gA} Q_P \quad (7)$$

In which:

$$C_P = H_A + \frac{a}{gA} Q_A - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| \quad (8)$$

$$C_M = H_B + \frac{a}{gA} Q_B + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| \quad (9)$$

For internal sections where two characteristics met, as a point P in **Figure 1**, equations (6) and (7) provide a simple solution for H_P . This can be written:

$$H_P = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (10)$$

Q_P can then be found by back substitution into equation (6) or (7). At each end of the pipe one of equations (6) and (7) will be available. Solution for unknown head and flow at this point cannot then be obtained by the above procedure. Instead, consideration must be given to the nature of the boundary condition, which generally takes the form of a prescribed relation between head and flow. Among MOC main advantages highlighting its ease of use, speed and explicit nature, which allows calculate the variables Q and H directly from previously known values [3, 23]. The main disadvantage of MOC is to be met with the Courant stability criterion (C_n) that can limit the magnitude of the time step (Δt) common for the entire network. In order to get $C_n = 1.0$, some pipe initial properties can be modified (length and / or wave speed). Another way is to keep the initial conditions and apply numerical interpolations with risk of generating errors (attenuations) in the solution [4]. MOC stability criterion states that [9, 17-21]:

$$C_n = \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1.0 \quad (11)$$

Where: Δt = time step and Δx = reach length = L/N (with L = pipe length and N = number of reaches). In general, MOC gives exact numerical results when $C_n = 1.0$; otherwise, it generates erroneous results in form of attenuations (when $C_n < 1.0$) or numerical instability (when $C_n > 1.0$).

2.4 Simple one-node boundary condition

According to Karney [7], one the most important boundary conditions the multi-pipe frictionless junction (**Figure 2**).

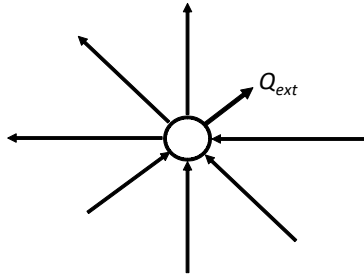


Figure 2 Ordinary node (adapted from [7, 8]).

Let N_1 be the set of all pipes whose assumed direction is toward the node in question; similarly, let N_2 be the set of all pipes whose assumed direction is away from the junction. Let one flow be identified as external and governed by an auxiliary relation. The sign convention is that positive flows are directed away from the junction being considered. The assumption that the junction is frictionless is equivalent to saying that the hydraulic grade line elevation at the node can be represented by a single number, designed H_p . For all pipes belonging to the set N_1 , the C^+ characteristic equation holds, while for members of N_2 the C^- characteristic equation applies. Equations (6) and (7) can be rearranged to obtain:

$$Q_{Pi} = \frac{-H_p}{B_i} + \frac{C_{Pi}}{B_i} \quad \forall i \in N_1 \quad (12)$$

$$-Q_{Pj} = \frac{-H_p}{B_j} + \frac{C_{Mj}}{B_j} \quad \forall j \in N_2 \quad (13)$$

In which: Q_{Pi} (Q_{Pj}) represents the discharge at the boundary section of pipe i (j). The continuity equation for the junction requires the sum of the flows entering the node to equal the sum of the flows leaving the node. Thus, the continuity equation can be written:

$$\sum_i Q_{Pi} - \sum_j Q_{Pj} - Q_{ext} = 0 \quad (14)$$

Equations (12) and (13) can be substituted directly into equation (14) and an expression for H_p is obtained. The result is:

$$H_p = C_c - B_c \cdot Q_{ext} \quad (15)$$

Equation (15) represents the general multi-pipe junction with one external flow which allows a simple treatment of networks with complex topology [11, 25], where:

$$\frac{1}{B_c} = \sum_i \frac{gA_i}{a_i} + \sum_j \frac{gA_j}{a_j} \quad (16)$$

$$C_c = B_c \left[\frac{gA_i}{a_i} \sum_i C_{Pi} + \frac{gA_j}{a_j} \sum_j C_{Mj} \right] \quad (17)$$

2.5 Modelling of the pressure-sensitive demands

According to Jung et al. [6], in conventional transient models is presumed that the nodal demand is pressure-insensitive under all operating conditions, even though is known that in the actual systems the demand tends to fluctuate according to the nodal pressure. The pressure-sensitive demand can be simulated with emitters that discharge the flow to the atmosphere through a nozzle or orifice. The flow rate through the emitter varies as a function of the pressure available at the junction j and it can be expressed as [1, 6, 12]:

$$q_j = C_{emit} \cdot p_j^\beta \quad (18)$$

Where q_j = flow rate (L/s) from emitter and p_j = pressure (m) at emitter. Both C_{emit} = emitter coefficient (L/s/m $^\beta$) and β = emitter exponent are normally provided by the emitter manufacturers or obtained via least squares fitting to field or laboratory data [12]. Using equation (18), the emitter is used to simulate the effect of the pressure-sensitive demand.

2.6 Development of the equations

Making $q_j = Q_{ext}$ and $p = (H_p - z)$ in equation (18), and replacing the resultant expression into equation (15), the following expression can be obtained:

$$H_p = C_c - B_c \cdot C_{emit} \cdot (H_p - z)_j^\beta \quad (19)$$

With z = junction elevation. Re-ordering equation (19) we obtain:

$$H_p + B_c \cdot C_{emit} \cdot (H_p - z)_j^\beta - C_c = 0 \quad (20)$$

The novelty that equation (20) gives is that it allows calculate the pressure-sensitive demand in any ordinary node no matter the number of pipes connected to it. Equation (20) is general because it can be reduced to equation (15) when it is assumed that demand is pressure-insensitive ($\beta = 0.0$), that means $C_{emit} = q_j = Q_{ext}$ ($L/s/m^{0.0} = L/s$) and $(H_p - z)_j^{0.0} = 1$.

2.7 Solution by Newton-Raphson method

In equation (20) the only unknown variable H_p cannot be directly calculated because of its non-linearity, so that Newton-Raphson (NR) method should be applied. The NR method is a powerful technique for solving equations numerically. Like so much of the differential calculus, it is based on the simple idea of linear approximation. The NR iteration is the following: let x_0 be a good estimate of H_p and let $H_p = x_0 + h$. Since the true root is H_p , and $h = H_p - x_0$, the number h measures how far the estimate x_0 is from the truth. Since h is "small", we can use the linear (tangent line) approximation to conclude that:

$$0 = f(H_p) = f(x_0 + h) \approx f(x_0) + hf'(x_0) \quad (21)$$

Where:

$$H_p = x_0 + h \approx x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (22)$$

The new improved estimate x_1 of H_p is therefore given by:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (23)$$

Continue in this way, if x_N is the current estimate, then the next estimate x_{N+1} is given by:

$$x_{N+1} = x_N - \frac{f(x_N)}{f'(x_N)} \quad (24)$$

The application of formula (24) is for solving equations of the form $f(x) = 0$. The solution is obtained after some calculations until when a pre-specified control value is satisfied.

3. Results

3.1 Example of application 1

The example pipe network consists of a constant level reservoir (upstream) with $H_0 = 100$ (m), 5 pipes in series and water

demands at nodes 2 to 6 [6]. The transient flow is generated by the decrease of the demand at junction 6 in 1 (s). The **Figure 3** and **tables 1** and **2** show the pipe network example and the system data, respectively [6]. The **Figures 4** and **5** show the pressure as function of time at junctions 2, 4 and 6 according to following scenarios:

Scenario 1: pressure-insensitive demand. In this case the pressure-insensitive demand (q_0) in junctions 2 to 6 means taking into account $\beta = 0$. For that reason, water demands on nodes 2 to 6 are kept constant and equal to 0.2 (m^3/s) during the simulation time.

Scenario 2: pressure-sensitive demand. In this case equation (20) is solved via NR in order to model the pressure-sensitive demand in junctions 2 to 6, taking into account $\beta = 0.5$ such as is recommended by some authors like Jung et al. [6].

In both scenarios the simulation time step is $\Delta t = 0.2$ (s), $\Delta x = L/N = 1000 / 5 = 200$ (m) and the Courant number in pipes 1 to 5 is: $C_n = a \cdot \Delta t / \Delta x = 1,000 \cdot 0.2 / 200 = 1.0$. Steady-state flow was calculated using EPANET [10]. In the analyzed example, the general sequence of events is the following: after creating the initial surge, the surge wave of the pressure-insensitive demand was propagated without any disturbance except that the friction loss along the pipeline caused a slight attenuation, as is seen in **Figure 4**. On the other hand, the surge wave of the pressure-sensitive demand experienced dramatic pressure attenuation when it passed the junctions (**Figure 5**). According to Jung et al. [6], this is because the positive surge caused a great discharge (higher than the constant demand) through the demand node, and then the demand increase caused a negative surge that was propagated in both upstream and downstream directions. Therefore, the negative surge created from the pressure-sensitive demand interacted with the initial positive surge, causing some pressure dissipation.

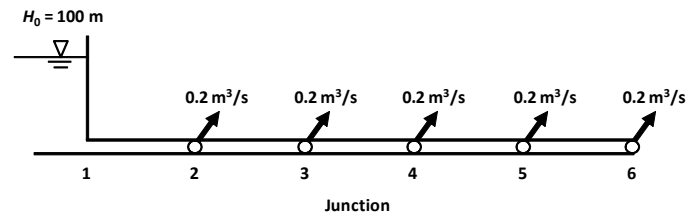


Figure 3 A small pipeline system (adapted from [6]).

Table 1 Pipes data (adapted from [6]).

Pipe number	Diameter D (mm)	Length L (m)	Flow Q_0 (L/s)	Friction factor f	Wave speed a (m/s)
1	1,000	1,000	1,000	0.016	1,000
2	1,000	1,000	800	0.016	1,000
3	1,000	1,000	600	0.016	1,000
4	1,000	1,000	400	0.016	1,000
5	1,000	1,000	200	0.017	1,000

Table 2 Junctions data (adapted from [6]).

Junction number	Initial piezometric head H_0 (m)	Elevation z (m)	Demand q_0 (L/s)
1	100.00	0	0.0
2	98.71	0	200
3	97.88	0	200
4	97.40	0	200
5	97.19	0	200
6	97.13	0	200

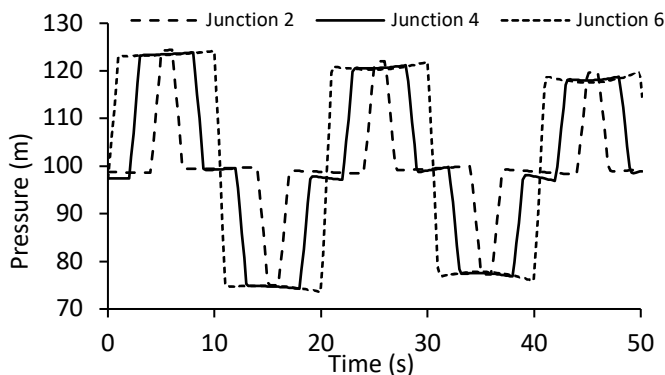


Figure 4 Pressure head profiles using pressure-insensitive demand. ($\beta = 0$).

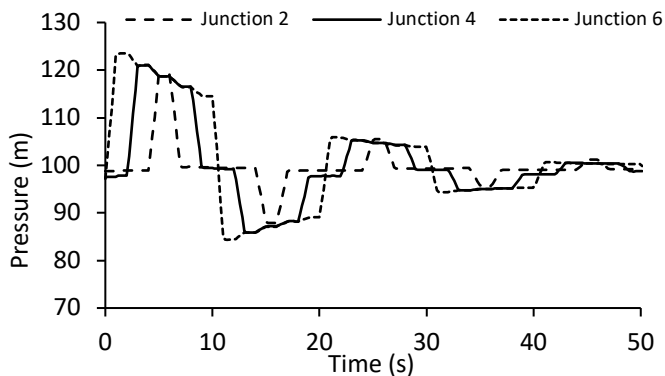


Figure 5 Pressure head profiles using pressure-sensitive demand. ($\beta = 0.5$).

When the initial positive surge reached the upstream reservoir, the behavior of pressure-sensitive demand was the opposite of the initial positive surge because the positive surge was converted into a negative surge. The negative surge caused a lower discharge (lower than the constant demand) through the demand node, and then the resulting decrease demand caused a positive surge, which dissipated the reflected negative surge from the reservoir. **Table 3** shows the maximum positive surge (obtained by subtracting the maximum transient pressure from the initial steady pressure), the maximum negative surge (obtained by subtracting the minimum transient pressure from the initial steady pressure), and their differences for junctions 2, 4 and 6 and for both pressure-insensitive and pressure-sensitive demand analyses. The results in **Table 3** show a good fit level with the results reported by Jung et al. [6].

Table 3 Maximum positive and negative surges (PID = pressure-insensitive demand, PSD = pressure-sensitive demand).

Junction number	Maximum positive surge		Minimum positive surge	
	PID	PSD	PID	PSD
2	25.7	20.3	-23.8	-10.8
4	26.5	23.6	-23.2	-11.5
6	27.1	26.4	-23.5	-12.8

3.2 Example of application 2

Example 1 served to verify the correct functioning of the proposed algorithm. Next, the algorithm will be tested in the complex pipe network shown in **Figure 6**, which consists of 45 pipes, 29 junctions, 1 constant level reservoir and a valve that closes in 1 (s). In junctions 8 and 21 there are constant water demands of 50 (L/s) and 15 (L/s), respectively. In the junctions 4, 11, 17, 23, 24 and 28 there are water demands of magnitude $q_0 = 5$ (L/s) each one. All the nodes have elevation 0 (m). The **tables 4** and **5** show the junctions and pipes data, respectively. The pipe network discretization considers $\Delta t = 0.05760875$ (s) and a N value that ranges between 2 and 14 depending on the lengths of the pipes. Steady-state flow was calculated using EPANET [10]. The system was solved by the MOC with $C_n = 1.0$ in all pipes. Figures 7 and 8 show the pressure as function of time at junctions 11, 17, 24 and 28 according to the following scenarios:

Scenario 1: pressure-insensitive demand. The transient flow is generated by valve closure in 1.0 (s). In this case the pressure-insensitive demand (q_0) in junctions 4, 11, 17, 23, 24 and 28 means taking into account $\beta = 0.0$. In nodes 8 and 21 the water demand also keeps pressure-insensitive during the simulation time.

Scenario 2: pressure-sensitive demand. The transient flow is generated by valve closure in 1.0 (s). In this case equation (20) is solved via NR in order to model the pressure-sensitive demand in junctions 4, 11, 17, 23, 24 and 28, taking into account $\beta = 0.5$. In nodes 8 and 21 the water demand keeps pressure-insensitive during the simulation time.

Table 4 (cont.) Junctions data.

Junction number	Initial piezometric head H_0 (m)	Demand q_0 (L/s)
13	38.90	0
14	37.87	0
15	50.12	0
16	45.42	0
17	41.28	5
18	38.03	0
19	36.97	0
20	34.30	0
21	31.39	15
22	40.69	0
23	36.00	5
24	35.63	5
25	36.59	0
26	36.36	0
27	37.56	0
28	34.13	5
29	32.72	0

Table 5 Pipes data.

Pipe number	Diameter D (mm)	Length L (m)	Flow Q_0 (L/s)	Friction factor f	Wave speed a (m/s)
1	200	120	145.00	0.017	1,036.893
2	150	120	58.05	0.019	1,038.224
3	150	120	50.13	0.019	1,038.672
4	110	120	16.16	0.021	187.665
5	150	120	16.21	0.020	188.448
6	200	120	50.00	0.018	187.774
7	75	120	4.19	0.025	1,040.560
8	150	169.71	33.79	0.019	980.057
9	200	120	86.95	0.018	186.597
10	150	120	44.75	0.019	1,038.976
11	150	120	34.63	0.020	1,039.549
12	110	120	17.39	0.021	187.535
13	75	120	6.23	0.024	206.892
14	75	120	3.15	0.025	207.589
15	75	169.71	2.88	0.026	209.770

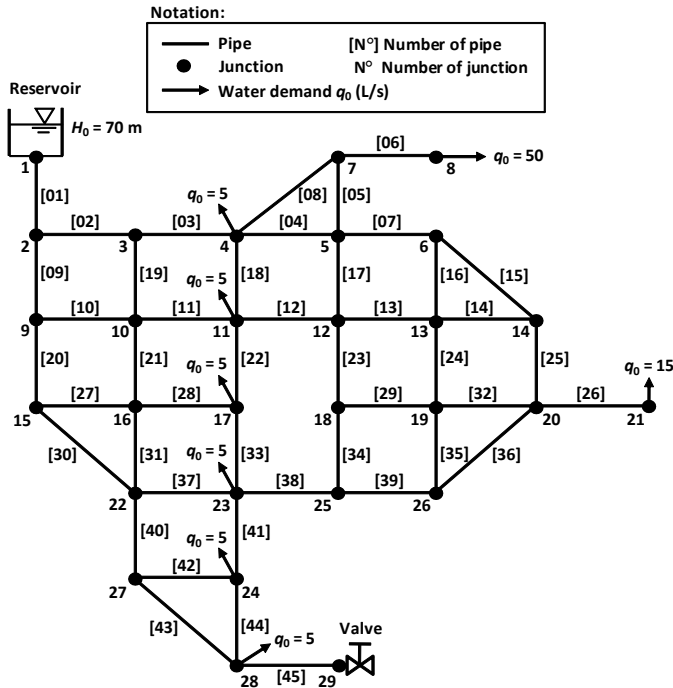


Figure 6 Pipe network example.

Table 4 Junctions data.

Junction number	Initial piezometric head H_0 (m)	Demand q_0 (L/s)
1	70.00	0
2	58.70	0
3	50.44	0
4	44.25	5
5	40.88	0
6	39.11	0
7	40.18	0
8	38.76	50
9	54.55	0
10	49.59	0
11	46.57	5
12	42.69	0

Table 5 (cont.) Pipes data.

Pipe number	Diameter D (mm)	Length L (m)	Flow Q_0 (L/s)	Friction factor f	Wave speed a (m/s)
16	75	120	1.31	0.037	208.005
17	75	120	4.23	0.024	207.344
18	75	120	4.83	0.024	207.208
19	110	120	7.92	0.024	188.532
20	150	120	42.2	0.019	1,039.121
21	110	120	18.04	0.021	692.441
22	75	120	7.41	0.024	206.624
23	75	120	6.94	0.024	206.731
24	75	120	4.38	0.025	207.310
25	75	120	6.03	0.024	206.937
26	110	120	15.00	0.021	187.787
27	110	120	19.21	0.021	692.318
28	110	120	17.98	0.021	692.447
29	75	120	3.19	0.025	207.580
30	110	169.71	22.99	0.021	979.550
31	110	120	19.27	0.021	187.337
32	75	120	5.19	0.024	207.127
33	110	120	20.39	0.021	187.220
34	75	120	3.75	0.027	207.453
35	75	120	2.38	0.029	207.763
36	75	169.71	3.78	0.024	209.566
37	75	120	6.96	0.024	206.726
38	75	120	2.35	0.029	207.770
39	75	120	1.40	0.025	207.985
40	150	120	35.30	0.020	1,039.511
41	200	120	24.70	0.020	1,040.722
42	75	120	4.38	0.025	207.310
43	150	169.71	30.92	0.020	980.219
44	150	120	24.08	0.020	1,040.146
45	200	120	50.00	0.018	1,039.917

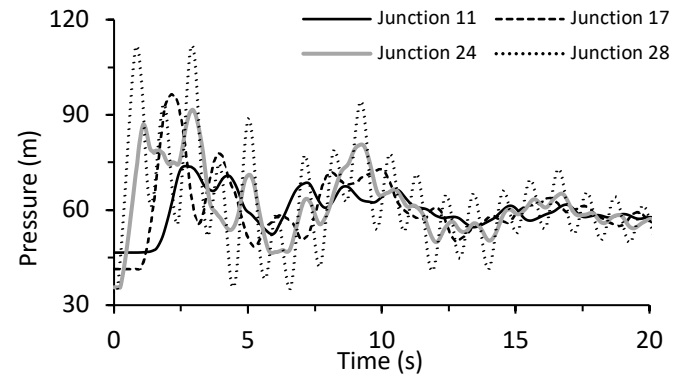


Figure 7 Pressure head profiles ($\beta = 0.0$)

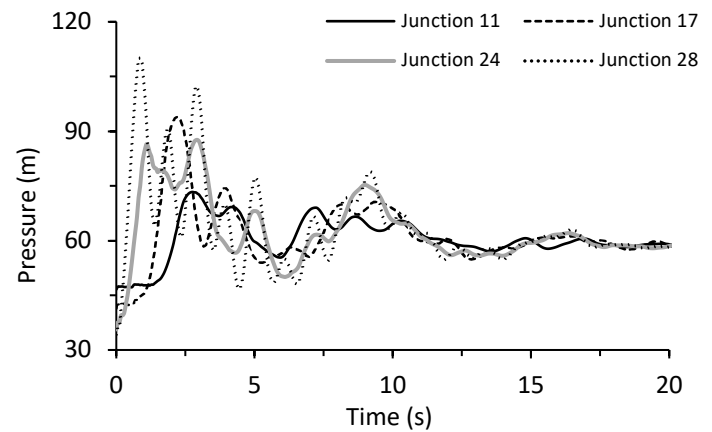


Figure 8 Pressure head profiles ($\beta = 0.5$)

When comparing Figures 7 and 8 it is verified that PSD reduce the extreme pressures magnitude, which tend to decay quickly after 5 (s) of simulation time. Table 6 shows a comparison between maximum positive and negative surges when PID and PSD scenarios are simulated.

Table 6 Maximum positive and negative surges (PID = pressure-insensitive demand, PSD = pressure-sensitive demand).

Junction number	Maximum positive surge		Minimum positive surge	
	PID	PSD	PID	PSD
11	27.3	26.8	0.0	-0.5
17	55.2	52.7	0.0	-0.3
24	55.9	51.9	0.0	0.0
28	77.5	75.8	0.0	0.0

4. Conclusions

Each hydraulic modeling exercise requires certain assumptions and approximations to simplify the problem and facilitate obtaining the solution. The assumption of pressure-insensitive demand has been widely applied to surge analysis but this modeling approach may be problematic because it ignores the implicit relationships between demand and pressure inherent in actual pipe systems [6]. The pressure transients can drastically alter the local pressures, which in turn can significantly affect the magnitude of nodal demands that can be extracted. The assumption of pressure-insensitive demand exaggerates a surge wave in the system, leading to conservative solutions which could lead to overdesign surge-protection devices. An over designed system sometimes can be more detrimental than an under designed one because the over designed hydraulic devices themselves may deteriorate the surge response of the system. A more realistic water hammer simulation should always consider pressure-sensitive demand behavior in some singular network nodes, even when this approach may increase the numerical problem complexity. For that reason, in some cases could be more efficient to apply the pressure-sensitive demand approach only on network nodes which often present very high and fast flow variations, like sudden demand due to fire cases. Another application for pressure-sensitive demand approach is for more accurately estimate contaminant intrusion in WDS [6]. Contaminants can intrude into pipes through leaks during a negative pressure transient; the surge model using pressure-sensitive demand can simulate the location, amount and duration of these intrusions. The application of pressure-sensitive demand approach in very large and complex pipe networks may affect the execution time because the Newton-Raphson method must be applied in order to calculate the pressure-sensitive demand in hundreds or thousands of significant junctions, this in each time step. In the example 1 the execution time for scenarios 1 and 2 was 0.7 (s) and 0.8 (s), respectively. In example 2, the execution time was 19.7 (s) and 20.2 (s) for scenarios 1 and 2, respectively. Water hammer program was carried out in a standard PC of 32 bits with a processing speed equal to 1.66 (GHz). Proposed algorithm needs the following improvements, such as the inclusion in the model of the cross-correlation (interdependence) between forthcoming demands, and to implement an algorithm that allows calculate the transient flow in systems with uniformly distributed demands, not only in the junctions of the pipe network but also on pipe internal nodes without having to alter the discretization initially adopted for the system. This is because it is well known that water demands are distributed along the pipelines, and that their allocation at the junctions just corresponds to a simplification generally accepted for modeling purposes. This would allow having simulations closer to reality.

Finally, the NR method sometimes it may not converge due to different reasons. Sometimes it may overlook the root you are trying to find and converge to a different root, and sometimes it may fail to converge altogether. In this sense, NR method is very sensitive to β value in equation (20), being recommendable always to work with β equal to or near 0.5.

5. References

- [1] Araujo L.S., Ramos H., Coelho S.T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20: 133-149.
- [2] Brown K. (2007). Modelling leakage in water distribution systems. Master of Science Thesis. The Florida State University.
- [3] Chaudhry M.H. (1979). *Applied hydraulic transients*, p. 266. New York: Van Nostrand Reinhold. * p. 27-33.
- [4] Chaudhry M.H., Hussaini M.Y. (1985). Second-order accurate explicit finite-difference schemes for waterhammer analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 523-529.
- [5] Jowitt P.W., Xu C. (1990). Optimal valve control in water-distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4).
- [6] Jung B.S., Boulous P.F., Wood D.J. (2009). Effect of pressure-sensitive demand on surge analysis. *Journal of AWWA*, 101(4): 100-111. <http://www.mwhsoft.com/products/surge/papers/jawwaapr09surgepaper.pdf>
- [7] Karney B.W. (1984). Analysis of fluids transients in large distribution networks. PhD. Thesis. Vancouver: University of British Columbia. <http://hdl.handle.net/2429/25312>
- [8] Karney B.W., McInnis D. (1992). Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7): 1014-1030.
- [9] Larock B.E., Jeppson R.W., Watters G.Z. (2000). *Hydraulics of pipeline systems*, p. 533. Boca Raton: CRC Press. p* 341.
- [10] Rossman L.A. (1993). User's manual for EPANET. Drinking Water Resources Division. Cincinnati: USEPA.
- [11] Salgado R., Twyman C., Twyman J. (1992, 8-12 Septiembre). Desarrollo de un algoritmo híbrido para el análisis del escurrimiento impermanente rápido en redes de tuberías a presión. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica (pp. 483-493). Cartagena: IAHR.
- [12] Salgado R., Rojo J., Zepeda S. (1993). Extended gradient method for fully non-linear head and flow analysis in pipe networks. *Integrated Computer Applications in Water Supply* (Vol. 1). New York: John Wiley & Sons. 49-60.
- [13] Seyoum A.G., Tanyimboh T.T. (2014). Practical application of pressure-dependent EPANET extension. *CUNY Academic Works*, pp. 7.



- [14] Siew C., Tanyimboh T.T. (2012). Pressure-dependent EPANET extension. *Water Resources Management*, 26: 1477-1498.
- [15] Suribabu C.R., Neelakantan T.R. (2011). Balancing reservoir based approach for solution to pressure deficient water distribution networks. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(2): 639-647.
- [16] Twyman J. (2016). Wave speed calculation for water hammer analysis. *Obras y Proyectos*, UCSC. 20: 86-92. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200007>
- [17] Twyman J. (2016, 26-30 Septiembre). Golpe de Ariete en una Red de Distribución de Agua. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (pp. 10). Lima: IAHR (Spain Water and IWHR China).
- [18] Twyman J. (2016). Water hammer analysis using the Method of Characteristics. *Revista de la Facultad de Ingeniería (Universidad de Atacama)*, 32(2016): 1-9. <http://www.revistaingenieria.uda.cl/publica.php?tipot=1&tipov=2>
- [19] Twyman J. (2017). Water hammer analysis in a water distribution system. *Ingeniería del Agua*, 21(2): 87-102. <https://doi.org/10.4995/la.2017.6389>
- [20] Twyman J. (2017). Water hammer analysis using a hybrid scheme. *Journal of Construction and Civil Engineering RIOCI*, 7(2017): 16-25. <http://www.rioc.cl/index.php/RIOC/article/view/16>
- [21] Twyman J. (2018). Water hammer analysis using an implicit finite-difference method. *Ingeniare*, 26(2): 307-318.
- [22] Wan W., Mao X. (2016). Shock Wave Speed and Transient Response of PE Pipe with Steel-Mesh Reinforcement. *Shock and Vibration*, Volume 2016 (2016). Article ID 8705031. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8705031>
- [23] Wylie E.B., Streeter V.L. (1978). *Fluid transients*, p. 206. New York: McGraw-Hill. Int. Book Co. * p. 22-23.
- [24] Wylie E.B. (1984). Fundamental equations of waterhammer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (4): 539-542.
- [25] Wylie E. B. (1986). Liquid transient flow in piping systems. In Arndt R.E., Stefan H.G., Farrell C., Peterson S.M. (1986). *Advancements in Aerodynamics. Fluid Mechanics and Hydraulics*, 50-57.



Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad histórica de Oviedo.

Sustainable Urban Drainage Systems and the new green streets design paradigm for stormwater management: A proposal for the historical city of Oviedo.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
29-05-2018
Aceptado
25-07-2018
Publicado
08-11-2018

Palabras Clave:
BMP
Infraestructura verde
Rehabilitación urbana
SUDS
WSUD.

Article history:

Received
29-05-2018
Accepted
25-07-2018
Available
08-11-2018

Keywords:
BMP
Green infrastructure
SUDS
Urban retrofitting
WSUD.

N. Vallina¹, C. Costales-Campa¹, R. Fernández¹, F. Robleda-Alvarez¹, L.A. Sañudo-Fontaneda^{1,2}

¹ UOStormwater. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo.
Escuela Politécnica de Mieres, Asturias, España.

² Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Coventry University, Ryton Gardens, Coventry, UK.
sanudoluis@uniovi.es, teléfono: +34985458196.

Resumen

Las ciudades están sometidas a inclemencias meteorológicas como inundaciones y sequías, cada vez con mayor frecuencia, debido al cambio climático. La acción del ser humano sobre el medioambiente ha incrementado dicho impacto, generando sensaciones de inseguridad e incomodidad en los ciudadanos. Debido a ello, se ha generado una sensación negativa hacia el agua de lluvia, apartándola de sus caminos naturales y haciéndola desaparecer de la vida de la ciudad. En los últimos años, se ha desarrollado una tendencia denominada Diseño Urbano Sensible al Agua (DUSA), que mediante el uso de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), ha cambiado el paradigma de la gestión del agua de lluvia, poniéndola de nuevo en valor. Este artículo introduce las bases de este cambio de paradigma a través del diseño de calles verdes, al mismo tiempo que muestra una propuesta desarrollada por la Universidad de Oviedo, de rehabilitación hidrológico-urbanística de dos grandes áreas de la ciudad de Oviedo, cuantificando el impacto de la aplicación de estas técnicas en la hidrología de esta histórica ciudad española. La reducción esperada en escorrentía superficial es de un 21,9% y en un 12,5% en las áreas de actuación proyectadas del Bulevar de Santuyano y el Campo San Francisco. Finalmente, la docencia en Universidad tiene un gran potencial de transferencia del conocimiento, como lo demuestra el resultado de este proyecto pionero en Europa.

Abstract

Cities are subjected to adverse weather conditions such as flooding and droughts which occur more frequently due to climate change. Anthropogenic influence on the environment has contributed to increment climate change effects, producing insecurity amongst the citizens and lack of amenity. In consequence, a negative approach to stormwater has been portrayed, taking stormwater away from the surface of urban environments. Water Sensitive Urban Design (WSUD) has arisen as a new paradigm to manage stormwater through Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), bringing value back to stormwater. This article introduces the bases to this change by using green streets design whilst showing a new proposal developed at the University of Oviedo. This proposal focuses on the hidrological and urban

retrofit of two large areas of the historical city of Oviedo, Spain, quantifying the impact of the design and potential implementation of SUDS techniques on the hydrology of the city. Runoff reduction values ranged from 12.5% in the Campo San Francisco up to 21.9% in the Santuyano's Boulevard. Furthermore, the impact of the teaching innovation project at the University of Oviedo, which is pioneering in Europe, has proven to have a great potential for knowledge transfer through the students' participation in this work.

1. Introducción

El proceso de urbanización en todo el mundo ha conllevado que el 54% de la población mundial viva en áreas urbanas según datos de las Naciones Unidas [1]. Este proceso de incremento de las actividades de urbanización ha propiciado un aumento crítico de la impermeabilización de los suelos urbanos debido a las diferentes actividades sobre el territorio [2]. Este proceso, junto a la creciente problemática del cambio climático, ha generado un escenario de extremos con fuertes inundaciones y sequías duraderas en todo el mundo [3]. La principal causa, no obstante, de esta problemática proviene de la interrupción del ciclo natural del agua en la ciudad, donde las carreteras, los aparcamientos, las cubiertas de los edificios y las aceras pavimentadas son las principales fuentes de impermeabilización de la "dermis urbana" [4]. Sin embargo, no solamente se generan los ya citados problemas, sino que además se produce un desarrollo importante de los procesos de degradación de los cauces naturales como ríos, arroyos y humedales, entre otros [5]. Además, los impactos económicos de los desastres asociados a las inundaciones han sido cuantificados como los de mayor envergadura en el mundo [6].

Investigaciones llevadas a cabo en los últimos años han demostrado que dicho proceso de degradación hidroecológica [7] tiene su eco en el aumento de la contaminación urbana, a través, principalmente, del fenómeno conocido como contaminación difusa [8]. La contaminación difusa hace referencia a un tipo de contaminación no puntual o específica, la cual puede incluir tanto los contaminantes presentes en la atmósfera y que hayan podido ser arrastrados por el agua de lluvia en su caída, como los contaminantes arrastrados por la escorrentía superficial producida por dicha agua de lluvia [9].

La Directiva Marco del Agua [10] representó un cambio hacia el nuevo paradigma de gestión del agua de lluvia en las ciudades y supuso un aumento del conocimiento y la exigencia de tratamiento de los contaminantes urbanos que llegaban a los cauces naturales de agua que atraviesan las ciudades. Entre los contaminantes más comunes que se pueden encontrar en la escorrentía urbana están los siguientes [11]: sólidos en suspensión, metales pesados (Cd, Pb, Zn...), hidrocarburos y sus derivados, herbicidas y pesticidas, materia orgánica, nutrientes (N and P), coliformes fecales y productos farmacéuticos. Estos

últimos han aparecido como un nuevo contaminante en los últimos años [12].

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), también conocidos como Stormwater Best Management Practices (BMPs) en los Estados Unidos de América [13] han alcanzado un alto nivel de implementación en todo el mundo. Una de las principales características que poseen los SUDS es su capacidad de reducir el caudal de escorrentía generada en un episodio pluviométrico, ya que no se limitan a recoger y transportar el agua, sino que actúan sobre la generación de la escorrentía, disminuyéndola en origen [14], existiendo otros SUDS especializados en la captación de la escorrentía, en su transporte o en su infiltración [15]. Estos sistemas ofrecen una amplia gama de técnicas de drenaje que, distribuidas de manera óptima, tienen el potencial de convertir la zona de actuación urbana en un paisaje verde agradable al ciudadano, donde la calidad de vida aumenta considerablemente [16].

La investigación aplicada que se describe en este artículo es el fruto de un trabajo de innovación docente, pionero en Europa, llevado a cabo en la Universidad de Oviedo [17], mediante el cual, estudiantes del Máster en Ingeniería Civil forman un equipo de diseño de SUDS para participar en dos concursos de ideas internacionales para dar respuesta a problemas urbanos de la ciudad de Oviedo [18].

La investigación, que se divide en el desarrollo de 2 proyectos, persigue la necesidad de la rehabilitación de dos amplias zonas de la histórica ciudad de Oviedo: el Bulevar de San Julián de los Prados/Santuyano y el Campo San Francisco y su entorno urbano. Ambas zonas no poseen, en la actualidad, un uso eficiente del sistema del drenaje y del agua de precipitación recogida en la zona. Además, los vehículos propulsados con combustibles fósiles que circulan por la zona presentan el 35% de la contaminación ambiental de la ciudad y se vienen superando los límites establecidos por la Unión Europea en materia de dióxido de nitrógeno y partículas en suspensión *PM10*. [19] demostraron que el uso de SUDS pueden reducir considerablemente las partículas en suspensión *PM10* arrastradas por el agua de lluvia. Por ello, se ha llevado a cabo un estudio urbanístico de mejora del drenaje y del tráfico de ambas zonas de estudio, en base a un desarrollo sostenible, por medio de SUDS.

2. Metodología

2.1 Localización y características climáticas para el caso de estudio: Oviedo (España)

Las dos áreas de actuación de esta investigación son conocidas como Bulevar de San Julián de los Prados/Santuyano y El Campo de San Francisco, ambas en la ciudad asturiana de Oviedo (**Figura 1**), en el Noroeste de la Península Ibérica. Ambas zonas tienen unas características muy definidas y responden a patrones urbanísticos diferenciados. Este amplio rango permite analizar el impacto de los SUDS cuando se aplican sobre áreas más o menos consolidadas dentro de una ciudad, en la que, además, se tiene en cuenta el impacto sobre los edificios y áreas históricas.



Figura 1 Zonas propuestas para la intervención futura en la ciudad de Oviedo, Asturias (España). Fuente: Google Maps.

El área de estudio tiene un total de 80,23ha para el Bulevar de Santuyano y 7,38ha en el caso del Campo San Francisco, como se puede ver en la **Figura 1**. Se trata, por tanto, de zonas de intervención de gran tamaño, sobre todo en el caso del Bulevar de Santuyano.

Oviedo tiene una categoría climática *Cfb* según la clasificación de Köppen-Geiger para los climas del mundo [20]. Esto significa que la ciudad pertenece al dominio templado-frío oceánico con una nubosidad y humedad altas y un verano cálido. La temperatura media es de 14°C y la precipitación anual está en el entorno de 1000 mm, lo que representa un patrón de lluvias elevado en la España peninsular. La presencia cercana del Mar Cantábrico y de la Cordillera Cantábrica afectan la climatología de la ciudad.

2.2 Propuesta de intervención urbana

El planteamiento realizado para el espacio público de Oviedo se ha centrado en una serie de pilares fundamentales. Por un lado, la propuesta ha tratado de aportar un protagonismo central a la conexión de espacios públicos históricos dentro de la ciudad, llevando a cabo una rehabilitación integral, con el objetivo de transformarla y adecuarla a las necesidades crecientes en la Europa del siglo XXI. Dicha Europa requiere el diseño e implantación de soluciones basadas en la naturaleza (Nature Based Solutions en literatura anglosajona – NBS) [21]. La propuesta desarrollada en el presente artículo en este artículo contiene los proyectos realizados con motivo de dos concursos internacionales de ideas organizados por la ciudad de Oviedo, tal y como se mencionaba en la introducción. Dichos proyectos se centraron en la “Renovación del espacio público Bulevar de San Julián de los Prados/Santuyano” y en el desarrollo de la “Movilidad sostenible y mejora de la calidad del espacio público en el entorno del Campo de San Francisco”. El equipo investigador de la Universidad de Oviedo propuso la inclusión de infraestructura verde, mediante el diseño de SUDS, de forma que se integren las crecientes exigencias de la Unión Europea dentro del nuevo urbanismo del siglo XXI en ciudades históricas. Los SUDS aportan una mayor seguridad en los alrededores de los principales enclaves turísticos, cediendo la importancia necesaria al conjunto del patrimonio histórico de la ciudad. Un buen ejemplo de ello es el pulmón verde de la urbe asturiana, el denominado Campo San Francisco, así como el entorno de la iglesia prerrománica de San Julián de los Prados o la Plaza de la Escandera, en pleno centro neurálgico de la ciudad ovetense.

Las tipologías SUDS proyectadas en ambas zonas de estudio son las siguientes:

Pavimento permeable: se trata de una estructura de pavimento (continua o modular) que permite la infiltración del agua a través de todas sus capas, pudiendo ser resistente al tráfico o no. Esta agua puede ser infiltrada al terreno o captada y retenida para su posterior reutilización y evacuación. Además de ofrecer un acabado y una resistencia adecuados a su localización y uso, debe asegurar la captación de la intensidad de lluvia de diseño. El agua atraviesa la superficie permeable hasta la capa inferior que sirve de reserva, atenuando las puntas del flujo de escorrentía superficial y tratando los contaminantes presentes en la escorrentía superficial. La estructura diseñada para el pavimento permeable consta de una sub-base de material calizo con un tamaño máximo de árido entre 20 y 40 mm, una capa de base de entre 4 y 6 mm y una capa de superficie de adoquín antideslizante impermeable en disposición permeable (**Figura 2**).



Figura 2 Detalle del pavimento permeable diseñado para el Paseo del Bombé en el Campo San Francisco. Fuente: elaboración propia.

Depósitos de infiltración: depresiones permeables en el terreno o embalses poco profundos que se diseñan para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en las cuencas adyacentes de tamaño considerable, hasta que se produce su infiltración al terreno al cabo del tiempo. Tienen capacidad para tratar los contaminantes presentes y para minimizar los efectos de la contaminación térmica sobre los medios receptores, pues el agua se templea con el ambiente antes de ser vertida.

La propuesta se basa, por tanto, en la inclusión de estos SUDS en puntos clave urbanos, en los que, gracias a la instalación de estas técnicas en lugares centrales y estratégicos como parques, plazas o aparcamientos para vehículos ligeros, permitiría la captación segura de agua de lluvia, almacenándola para su posterior reutilización o infiltrándola para recargar el acuífero superior de Oviedo. Con esta actuación se logra una mejora considerable de la movilidad, tanto peatonal como rodada, permitiendo el tránsito de viandantes mediante la eliminación de charcos, lo que apoya la realización segura de talleres ciudadanos culturales y la colocación de casetas, entre otras actividades ciudadanas.

Son conocidos los innumerables problemas existentes a lo largo de la ciudad por la presencia de charcos y escorrentías, que ponen en peligro la seguridad vial y peatonal, tanto a nivel individual como colectivo. Es por ello que, aprovechando la mala situación actual del firme en ciertos puntos de la ciudad, se proyecta su levantamiento y la incorporación de infraestructura verde en zonas que puedan resultar claves, como el Paseo del Bombé (**Figura 3**) o en aparcamientos disuasorios situados en las inmediaciones del futuro Bulevar de Santuyano (**Figura 4**), los cuales pueden funcionar para evitar el tráfico de vehículos en el casco histórico de la capital asturiana.



Figura 3 Zona de aplicación del sistema de firme permeable para el Paseo del Bombé, en el Campo San Francisco. Fuente: Google Maps.



Figura 4 Zona de aplicación del sistema de los depósitos de infiltración para el Bulevar de Santuyano. Fuente: Google Maps.

2.3 Análisis hidrológico de las zonas de actuación propuestas

El patrón de precipitaciones en Oviedo está caracterizada por eventos de lluvia largos y de baja intensidad, aunque pueden darse fenómenos climatológicos con mayores intensidades y duraciones cortas. Para el análisis de los datos de precipitaciones se ha utilizado la Estación Pluviométrica de Oviedo “El Cristo” con código 1249X, tomando datos desde 1973, basándose en datos previos analizados por Pérez Martínez [22].

Se han seleccionado 3 periodos de retorno, comúnmente utilizados en diseños de drenaje urbano convencional en Europa (2, 5 y 10 años). Los datos de precipitaciones medias diarias de la estación previamente mencionada se refinaron utilizando una distribución Gumbel, según el monográfico “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” [23], asociado a la Norma I.C-5.2. [24].

Como resultado de esos cálculos, se obtuvieron los siguientes valores de precipitaciones máximas diarias en Oviedo, como puede verse en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Precipitaciones máximas diarias según el periodo de retorno.

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima diaria según distribución Gumbel (mm)
2	50,66
5	66,94
10	79,10

Además de las precipitaciones máximas diarias, para determinar el volumen de escorrentía se crean cuencas discretizadas en las dos zonas de objeto de estudio, para determinar el coeficiente de escorrentía de cada una de ellas. En el bulevar de Santuyano, debido a su gran extensión, se identifican un total de 4 cuencas vertientes (**Tabla 2**). Por otro lado, el Campo San Francisco se discretiza en una única cuenca, puesto que el interés reside en la aplicación de SUDS en el Paseo del Bombé, sitio en la parte alta del parque (**Tabla 2**).

Tabla 2 Características de las cuencas vertientes discretizadas para el presente estudio.

Zona de estudio	Cuenca nº	Longitud (m)	Área total (ha)	Coeficiente de escorrentía
Bulevar de Santuyano	1	404	13,59	0,990
	2	505	25,20	0,989
	3	620	23,97	0,989
	4	712	17,48	0,990
Campo San Francisco	5	376	7,38	0,992

De las características de las cuencas destaca el alto grado de impermeabilidad, por lo que el empleo de SUDS en ambas cuencas permitiría mejorar las condiciones hidrológicas de dichas cuencas, recuperando parte del funcionamiento natural perdido durante el proceso de urbanización. Por último, calculado el volumen de lluvia y conocidas las cuencas, se determina el porcentaje de lluvia que permiten gestionar los SUDS.

De esta manera, siguiendo esta metodología, a través de la normativa IC-5.2 [24] se puede medir el impacto hidrológico del antes y el después de la posible implementación de esta estrategia urbana basada en el cambio de paradigma de la gestión del agua de lluvia mediante SUDS.

2.4 Otras metodologías empleadas

Además de los SUDS, el equipo investigador se ha apoyado en otras técnicas de ingeniería civil, arquitectura y urbanismo para potenciar, aún más, el impacto de la infraestructura verde y del cambio de paradigma propuesto. En consecuencia, se ha tenido en cuenta un diagnóstico profundo de la ciudad ovetense donde, en la actualidad, tal y como se menciona en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS), existe una demanda generalizada del transporte público [25]. Los espacios en el centro de la ciudad son reducidos y el tráfico rodado de vehículos interfiere en el confort del ciudadano, reforzando el uso de transporte urbano, el cual presenta, además, un alto nivel de satisfacción entre sus usuarios, tanto en frecuencias, como en limpieza y modernidad de la flota. No obstante, la presente actuación busca representar el cambio hacia una ciudad más verde y ecológica, integrada y concienciada con el transporte sostenible. El cambio se debe basar, por tanto, en este tipo de medios, aportando una mayor seguridad, tanto para el peatón, como para el usuario de la red de transporte urbano.

Los problemas de congestión de la ciudad se originan principalmente por el aumento significativo de la movilidad en vehículo privado que se ha producido en la misma durante estos últimos años. Por lo que se debe buscar una solución que trate de aprovechar al máximo el uso de todos los modos de transporte, buscando garantizar la movilidad en base al corazón de la ciudad, el Campo San Francisco, la descongestión del centro, la protección del patrimonio cultural, en especial la iglesia de Santuyano, muy castigada por la presencia de la actual autopista de entrada a la capital asturiana (A-66a), que transcurre a escasos metros de dicha iglesia, y la potenciación de la calidad y seguridad de los peatones.

Para la correcta interpretación de la situación actual se han llevado a cabo precisos aforos en la totalidad de las calles de la ronda interior de la ciudad, en la autopista A-66a — principal entrada y salida de Oviedo, origen de la buscada transformación — y en diversas vías de especial interés. La campaña de aforos se realizó durante el mes de febrero de 2018, centrándose de manera muy especial en los horarios punta de tráfico y dividiendo el estudio entre vehículos pesados, vehículos de transporte público y vehículos ligeros de particulares. Para este estudio se utilizó el Manual de Capacidad de Carreteras [26].

Como base y elemento de apoyo a los cálculos, se ha contado con los aforos realizados en el año 2012, recogidos en el PMUS, teniendo en cuenta que han sido tomados adecuadamente y que sus datos reflejan perfectamente la realidad existente en la fecha de muestra.

Además, de forma añadida a la campaña de aforos realizada, se han tenido en cuenta la totalidad de las actuaciones realizadas en la ciudad de Oviedo y alrededores, así como cambios circunstanciales en la población, parámetros importantes o detalles técnicos que hayan podido incidir o modificar, en mayor o menor medida, los valores prefijados una vez realizada la campaña. En definitiva, variables que puedan aportar un distintivo importante a la hora de realizar las diversas actuaciones proyectadas para el futuro. Situaciones como la apertura de nuevos aparcamientos en el entorno del centro urbano, cambio y creación del nuevo Hospital Universitario Central de Asturias (HUCA), el crecimiento de los barrios periféricos o la variación del número de usuarios del transporte y del vehículo privado, son factores que han resultado fundamentales para entender el correcto funcionamiento del sistema de la ciudad y buscar una solución óptima.

Para la realización del estudio, se analizó tanto la situación actual como la futura, que según la Norma I.C-3.1 [27] se consideró una previsión límite hasta el año horizonte del proyecto, eligiéndose como tal el posterior en 15 años de la fecha de entrada en servicio del vial, el año 2034. Con los parámetros marcados se puede saber que las vías del entorno del parque poseen un índice comprendido entre 5.000 y 20.000 vehículos por día, tratándose de unas intensidades relativamente elevadas en función de sus características físicas.

Con el estudio finalizado, se propusieron las medidas a proyectar para la mejora de las características actuales de tráfico. La propuesta para los concursos de ideas mantendrá la esencia ovetense, consiguiendo la buscada potenciación de los itinerarios peatonales y fomentando el uso del transporte público y la bicicleta. El incremento de zonas de infraestructura verde, la amplia presencia de árboles y la creación de parterres verdes con vegetación aportarán la sensación de naturaleza y belleza que necesitaba la ciudad.

La reducción de carriles en algunos tramos, la peatonalización de otros y la eliminación de aparcamientos no hará más que potenciar el uso del transporte público, reducir la intensidad media de vehículos y mejorar la circulación interior de Oviedo. Por último, se propone la implantación de un carril bici perimetral para el Campo San Francisco, que recorra las principales calles que lo delimitan y permitiendo la unión con

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad histórica de Oviedo. Vallina, Costales, Fernández, Robleda y Sañudo 35-44

otras redes que se espera que tengan continuidad en base al presente proyecto.

3. Resultados y Discusión

3.1 Impacto hidrológico de la intervención propuesta

Para determinar el impacto hidrológico de la intervención propuesta, se calculan los volúmenes de lluvia para un aguacero de 60 minutos y con periodo de retorno 10 años, comparando estos con el volumen que podrían llegar a almacenar los SUDS y determinando qué porcentaje de agua permiten gestionar. La razón para seleccionar este periodo de retorno y la duración del aguacero se basa en la utilización de los valores extremos de diseño.

Los cálculos hidrológicos se llevan a cabo empleando la norma 5.2-[24]. En primer lugar, se determina la precipitación diaria máxima, $P_m = 55 \text{ mm}$, y el coeficiente de variación, $C_v = 0,35$. Posteriormente, se calculan los coeficientes de escorrentía en las cuencas urbanas que destacan por estar muy próximas a 1, por lo que indica el alto grado de impermeabilización existente en el entorno urbano. Con estos valores, añadidos a la medición de las cuencas en el Bulevar de Santuyano y en el Campo San Francisco se obtienen los caudales de diseño con periodo de retorno igual a 10 años (Q_{10} en **Tabla 3**).

Tabla 3 Caudales de diseño obtenidos para periodo de retorno de 10 años.

Zona de estudio	$Q_{10} \text{ (m}^3/\text{s)}$
Bulevar de Santuyano	10,50
Campo San Francisco	0,94

Conocidos los Q_{10} y suponiendo una duración de aguacero de 60 min, se pueden determinar los volúmenes de lluvia que son el objeto de estudio, puesto que sirven para determinar el porcentaje de la lluvia gestionada por los SUDS, permitiendo reducir la escorrentía y reutilizar el agua para riego de los parques. Por tanto, a la hora de gestionar las aguas correspondientes a las zonas de actuación descritas anteriormente, se obtienen los siguientes resultados:

- La actuación en el entorno del Campo San Francisco mediante el empleo de SUDS en el Paseo del Bombé permite gestionar y almacenar el 12,5% de las aguas para el aguacero supuesto.
- En el entorno del Bulevar de Santuyano, la instalación de SUDS en el parque urbano, permite gestionar y almacenar el



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



Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las
calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad
histórica de Oviedo. Vallina, Costales, Fernández, Robleda y Sañudo 35-44

21,9 % del agua de escorrentía para el aguacero supuesto.

3.2 Impacto social

El impacto social se centra en la creación de espacios multifuncionales que son capaces de reducir los problemas de inundaciones, de contribuir al ahorro de agua potable para el riego de parques y el baldeo de calles, y de mejorar las condiciones de vida de los ciudadanos mediante el desarrollo de áreas destinadas a actividades culturales.

Una buena muestra de ello es la creación de espacios abiertos o grandes plazas que simulan las ágoras que funcionaban como espacios de reunión y cultura en las antiguas civilizaciones europeas. Como puede verse en la **Figura 5**, la Plaza de la Escandalera presenta elementos multifuncionales de recreo y su paisaje varía considerablemente gracias a la presencia de infraestructura verde y de diseños arquitectónicos que conectan el parque del Campo San Francisco con la propia plaza. Esto cumple con objetivos sociales fundamentales como los descritos por Lerer et al. [28], entre los que destacan los siguientes: históricos, sociales, estéticos y morales, estando todos ellos relacionados con la gestión del agua de lluvia.



Figura 5 Vista panorámica del diseño de la Plaza de la Escandalera con el Campo San Francisco de fondo. Fuente: elaboración propia.

El aumento de superficies de adoquinado antideslizante mejora la calidad del contacto de los viandantes con las superficies, haciendo los paseos más confortables. Además, la presencia de infraestructura verde reduce la temperatura en el centro de la ciudad, disminuyendo el impacto del efecto de isla de calor.

Un estudio realizado sobre el mantenimiento llevado a cabo en la actualidad en la ciudad de Oviedo, demuestra que la implementación de las técnicas SUDS propuestas en ambas zonas de estudio, no aumentará las necesidades de mantenimiento ni la adquisición de maquinaria específica de mayor coste. Por lo tanto, el impacto económico de este tipo de

medidas es muy positivo a largo plazo, y como ha venido a demostrar la investigación de Ossa-Moreno et al. [29] para su trabajo aplicado en la ciudad de Londres, incluye beneficios más amplios como el incremento del valor de las propiedades adyacentes, la reducción del gasto de agua potable y energético, así como la reducción de los impactos económicos debidos a los desastres naturales causados por el agua.

Además, la creación de un carril bici perimetral en el entorno del Campo de San Francisco, favorece y potencia el uso de la bicicleta, conjuntamente con una futura conexión con otros carriles ciclistas que vertebran la vetusta ciudad (**Figura 6**). Por último, la peatonalización de calles y plazas permite dar la deseada continuidad peatonal entre el parque y su entorno que, junto con la instalación de infraestructura verde —siguiendo la línea de desarrollo sostenible y reutilización de los recursos naturales establecida a nivel europeo—, otorga a la ciudad de Oviedo un nivel más alto de urbanismo y movilidad sostenible (**Figura 6**). Todas estas medidas adoptadas e impactos medibles han sido fruto de un proceso de participación ciudadana que ha ido recogiendo las necesidades detectadas por la ciudadanía de Oviedo.

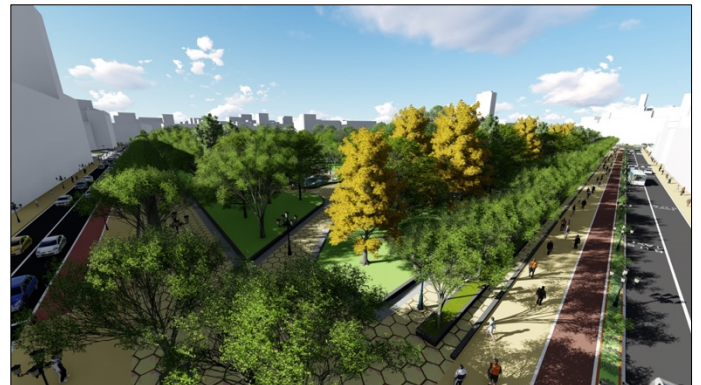


Figura 6 Carril bici perimetral (en color rojo) circundando el Campo San Francisco. Fuente: elaboración propia.

3.3 Otros impactos asociados

La actuación no se centra únicamente en los puntos mencionados anteriormente, sino que se espera una serie de impacto asociados en base a la actuación propuesta

La mejora del tráfico resulta más que evidente al realizar el cálculo de las intensidades medias diarias del antes y el después de la intervención propuesta, de la misma manera que se ha hecho con la situación actual, pero para el año horizonte fijado. Un ejemplo de los resultados puede ser consultado en la siguiente figura (**Figura 7**).

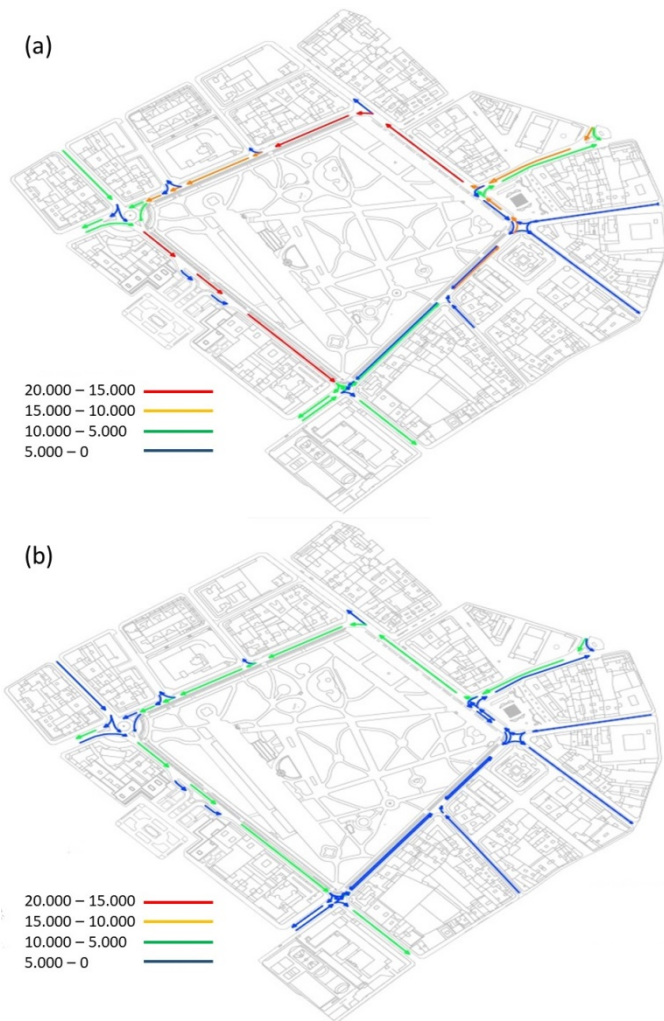


Figura 7 (a) Intensidad Media Diaria actual del tráfico rodado en los alrededores del Campo de San Francisco, y (b) la reducción esperada tras las actuaciones proyectadas en ambas zonas de estudio. Fuente: elaboración propia.

Los impactos analizados que sería posible que acaeciesen sobre la ciudad de Oviedo (Asturias, España) se dividen en directo, indirecto y, por último, inducido. El impacto directo se corresponde al despliegue de la nueva infraestructura, donde se engloba una zona de actuación emplazado en la periferia y centro del Campo San Francisco de la ciudad de Oviedo. Por otro lado, el impacto indirecto se corresponde con los empleos generados a raíz de la inversión efectuada, donde se prevé que los comercios locales y grandes superficies presentes en la zona se vean beneficiados, al haber un mayor tránsito peatonal por las calles del centro de la ciudad, lo que fomenta su papel en la economía local. Por último, el impacto económico inducido se corresponde con el empleo generado a raíz del consumo de los bienes y servicios habiéndose realizado la actuación, que

también ser verían incrementados, aproximadamente, en la misma medida que en el caso del impacto indirecto, al promover la presencia ciudadana en el ámbito de actuación, una vez se hayan terminado de ejecutar el planteamiento propuesto.

En lo relativo al impacto ambiental y acústico, junto con el estudio relacionado con la gestión de los residuos que recibiría la ciudad de Oviedo, muestra una situación que sería diversa en estos casos. El impacto ambiental previsto se estima notoriamente reducido, pues la actuación no generaría ningún tipo de impacto severo sobre el medio, aunque éste sea de gran calado para Oviedo y sus ciudadanos.

La ejecución de esta idea busca disminuir el uso en el consumo de los recursos naturales necesarios para llevar a cabo la idea, así como también el número de materias primas empleadas. Por otro lado, la gestión de los residuos se trata de un elemento relevante dentro de la ejecución y planificación de la obra, dentro de la cual se prevé su gestión, sus gestores y los métodos requeridos para que el número de residuos generados no se convierta en un problema medioambiental. Asimismo, se ha buscado en todo momento la reducción de los costes económicos relacionados, mediante los principios básicos del reciclaje y utilización dentro de la propia obra y su planificación, cuidada hasta el más mínimo detalle, lo que ha redundado también en la obtención de un presupuesto de ejecución material asumible por la ciudad. Finalmente, se ha contado con una mejora en la gestión ambiental de la organización, de manera que el control de los residuos generados, su reducción, y también su aprovechamiento, se encontrará dentro de los límites legales, medioambientales y funcionales.

4. Conclusiones

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible producen un cambio de paradigma en la gestión del agua de lluvia urbana, generando, además, impactos que van más allá de la gestión sostenible de las inundaciones. Entre esos impactos se encuentran la reducción de materiales contaminantes en las obras de construcción y rehabilitación, la reducción de los contaminantes presentes en la escorrentía urbana, la mejora de las condiciones de vida de los ciudadanos y la mejora de la biodiversidad en el centro de las ciudades.

La propuesta realizada por el equipo investigador y centrada en las áreas de actuación del Bulevar de Santuyano y el Campo San Francisco, contribuye a reducir en un 21,9% y en un 12,5%, respectivamente, la escorrentía, reduciendo las posibilidades de inundaciones bajo las condiciones de cambio climático.



La docencia en Universidad tiene un gran potencial de transferencia del conocimiento, como lo demuestra el resultado de este proyecto pionero en Europa, el cual protagonizan estudiantes del Máster en Ingeniería Civil de la Universidad de Oviedo, participando en los concursos internacionales de rehabilitación urbana de la ciudad de Oviedo [30].

5. Agradecimientos:

Los autores agradecen el financiamiento de la Universidad de Oviedo para el desarrollo del University of Oviedo Stormwater Engineering Research Team (UOStormwater) a través del proyecto con referencia PAPI-17-PEMERG-22 y del Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA) a través del proyecto con acrónimo Idea_SuDS y referencia SV-18-GIJÓN-1-23. De la misma forma, los autores quieren agradecer de manera especial a la Fundación de la Universidad de Oviedo (FUO) por el apoyo recibido para participar en los Concurso de Ideas Internacionales, y al Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo por su apoyo.

6. Referencias

- [1] Adyel, T.M., Oldham, C.E., Hipsey, M.R. (2016). Stormwater nutrient attenuation in a constructed wetland with alternating surface and subsurface flow pathways: Event to annual dynamics. *Water Research* 107, 66-82.
- [2] AEMET (2018). Iberian Climate Areas. Disponible online: <http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf>. (Accedido el 27 de mayo 2018).
- [3] Ayuntamiento de Oviedo (2018). Plan Movilidad Urbana Sostenible. Disponible online: <http://www.oviedo.es/>
- [4] plan-movilidad-urbana-sostenible. (Accedido el 27 de mayo de 2018).
- [5] BOE (2017). Anuncio del Ayuntamiento de Oviedo por el que se convoca concurso de ideas (anteproyectos) para la renovación del espacio público "Bulevar de San Julián de los Prados/Santuyano". BOE del 15 de julio de 2017. Disponible online: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2017-44012. (Accedido el 27 de mayo 2018).
- [6] BOE (2018). Anuncio del Ayuntamiento de Oviedo por el que se convoca concurso de ideas (anteproyecto) para mejorar la movilidad urbana y la calidad del espacio público en torno al "Campo de San Francisco". BOE del 22 de enero de 2018. Disponible online: <https://www.boe.es/boe/dias/2018/01/22/pdfs/BOE-B-2018-3809.pdf>. (Accedido el 27 de mayo 2018).
- [7] Brezonik, P.L., Stadelmann, T.H. (2002). Analysis and

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad histórica de Oviedo. Vallina, Costales, Fernández, Robleda y Sañudo 35-44

- predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Research* 36(7), 1743-1757.
- [9] Comisión Europea (2014). Construir una infraestructura verde para Europa. Unión Europea, Medio Ambiente. ISBN 978-92-79-39996-1.
 - [10] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.
 - [11] Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M. (2015) SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *s* 12(7), 525-542.
 - [12] Fresno, D.C., Bayón, J.R., Hernández, J.R., Muñoz, F.B. (2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia* 30(5), 255-260+306-308.
 - [13] Lashford, C., Charlesworth, S., Warwick, F., Blackett, M. (2014). Deconstructing the sustainable drainage management train in terms of water quantity - preliminary results for coventry, UK. *Clean - Soil, Air, Water* 42(2), 187-192.
 - [14] Lerer, S.M., Arnbjerg-Nielsen, K., Mikkelsen, P.S. (2015). A Mapping of Tools for Informing Water Sensitive Urban Design Planning Decisions—Questions, Aspects and Context Sensitivity. *Water* 2015, 7(3), 993-1012.
 - [15] Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010). Review article "assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Science* 10(8), 1697-1724.
 - [16] Ministerio de Fomento (1999). Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Serie Monografías. Dirección General de Carreteras. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes Dirección General de Carreteras.
 - [17] Ministerio de Fomento (2016a). Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. Gobierno de España.
 - [18] Ministerio de Fomento (2016b). Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1- IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras. Gobierno de España.
 - [19] Mitchell, G. (2005). Mapping hazard from urban non-point pollution: A screening model to support sustainable urban drainage planning. *Journal of Environmental Management* 74(1), 1-9.
 - [20] Ossa-Moreno, J., Smith, K.M., Mijic, A. (2017). Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK. *Sustainable Cities and Society* 28, 411-419.



- [21] O'Sullivan, A.D., Wicke, D., Hengen, T.J., Sieverding, H.L., Stone, J.J. (2015). Life Cycle Assessment modelling of stormwater treatment systems. *Journal of Environmental Management* 149, 236-244.
- [22] Page, J.L., Winston, R.J., Mayes, D.B., Perrin, C., Hunt, W.F. (2015). Retrofitting with innovative stormwater control measures: Hydrologic mitigation of impervious cover in the municipal right-of-way, *Journal of Hydrology* 527, 923-932.
- [23] Pérez Martínez, L. (2017). Infraestructura verde en ambientes urbanos. Revisión y aplicación práctica al Campo San Francisco de Oviedo. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Oviedo. Julio 2017.
- [24] Romana, M., Nuñez, M., Martínez, J.M., Díez de Arizaleta, R. (2010). Manual de Capacidad de Carreteras – HCM 2010. FC EDITORIAL; 1ª Edición. ISBN-10: 8416671192. 1168 pp.
- [25] Rushton, B.T. (2001). Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 127(3), 172-179.
- [26] Sañudo-Fontaneda, L.A., Alvarez-Rabanal, F.P., Alonso-Martínez, M., Martín-Rodríguez, A., del Coz-Díaz, J.J. (2017). Impacto de tribunales externos multidisciplinarios en el proceso de enseñanza-aprendizaje en estudios de Máster en Ingeniería. Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas (CUIEET 2017). 5-8 septiembre, Badajoz, España.
- [27] Sañudo-Fontaneda, L.A., Anderson, A.R., Hunt, W.F. (2018). Green Streets: The opportunity to design resilient stormwater management in the cities of the future. In the book: *Stormwater: sources, monitoring and management*. NOCA SCIENCES. Book chapter in press.
- [28] Schueler, T.R., Fraley-McNeal, L., and Capiella, K. (2009). Is impervious cover still important? Review of recent research. *J. of Hydrologic Engineering*. 14, 309-315.
- [29] United Nations. (2015). "World Urbanization Prospects: The 2014 Revision", Report ST/ESA/SER.A/366, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, United Nations, New York, New York.
- [30] Verlicchi, P., Al Aukidy, M., Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment-A review. *Science of the Total Environment* 429, 123-155.
- [31] Walsh, C.J., Fletcher, T.D., Burns, M.J. (2012). Urban Stormwater Runoff: A New Class of Environmental Flow Problem. *PLoS ONE* 7(9), e45814. Open Access.
- [32] Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., and Nguyen, V.T.V. (2011). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research* 103, 106-118.

Los artículos enviados a la revista RIOCI deberán ser trabajos originales que no han sido publicados previamente ni estar presentados a otra revista, para ser publicados con acceso abierto. Los artículos pueden ser escritos en inglés o español y deberán ser enviados en versión electrónica en **formato.doc o.docx**. Los artículos deberán ser subidos a través de la página web **www.rioci.cl** para lo cual debe registrarse y generar un envío. Otra opción de envío puede ser a través del correo electrónico **rioci@ufrontera.cl**, indicando el nombre, e-mail, afiliación institucional y grado académico del autor de correspondencia. El artículo será enviado a evaluadores externos especialistas en los temas específicos para su revisión. El Autor de Correspondencia puede sugerir al Editor revisores idóneos de acuerdo al tema del trabajo propuesto. El Editor podrá solicitar revisiones y correcciones antes de tomar una decisión final de aceptación o rechazo del artículo. Además, tenga en cuenta que:

- No hay tarifa de publicación
- Los artículos están disponibles gratuitamente tanto para los suscriptores como para el público en general con reutilización permitida.
- La revista aplica criterios de revisión por pares y estándares de aceptación.

Asegúrese de que los siguientes elementos estén presentes en sus manuscritos:

Un autor ha sido designado como el autor de correspondencia con los datos de contacto:

- Dirección de correo electrónico
- Dirección postal completa

El Manuscrito debe incluir:

- Palabras clave (máximo 4)
- Todas las figuras (incluir títulos relevantes)
- Todas las tablas (incluyendo títulos, descripción, notas al pie)
- A modo de referencia el manuscrito no debiese exceder de 10.000 palabras

Otras consideraciones

- El manuscrito ha sido corregido ortográficamente y se ha verificado la gramática.
- Todas las referencias mencionadas en la Lista de referencias se citan en el texto y viceversa.
- Se revisaron las políticas de la revista detalladas en esta guía y las normas en envío. a

Declaración y verificación

La presentación de un artículo implica que el trabajo descrito no se ha publicado previamente (excepto en forma de resumen o como parte de una conferencia o tesis académica publicada o como preimpresión electrónica), que no está bajo consideración para su publicación en otro lugar, que su publicación es aprobada por todos los autores y tácita o explícitamente por las autoridades responsables donde se realizó el trabajo, y que, si se acepta, no se publicará en otro lugar en la misma forma, en inglés o en cualquier otro idioma, incluido electrónicamente sin el consentimiento por escrito del titular de los derechos de autor.

Cambios en la autoría

Se espera que los autores consideren cuidadosamente la lista y el orden de los autores antes de enviar su manuscrito y proporcionen la lista definitiva de los autores en el momento de la presentación original. Cualquier adición, eliminación o reordenación de los nombres de los autores en la lista de autoría debe hacerse solo antes de que el manuscrito haya sido aceptado y solo si el editor de la revista lo aprueba.

Fuentes de financiamiento

Se le solicita que identifique quién brindó apoyo financiero para la realización de la investigación y / o preparación del artículo y para describir brevemente el papel del (de los) patrocinador (es), en su caso, en el diseño del estudio; en la recopilación, análisis e interpretación de datos; en la redacción del informe; y en la decisión de enviar el artículo para su publicación. Esta condición opcional puede ser incorporada en la sección "Reconocimientos" después de las Conclusiones del trabajo

Presentación

Nuestro sistema de envío en línea lo guía paso a paso a través del proceso de ingresar los detalles de su artículo y cargar sus archivos. Se requieren archivos editables (p. Ej., Word) para componer su artículo para la publicación final. Toda la correspondencia, incluida la notificación de la decisión del Editor y las solicitudes de revisión, se envía por correo electrónico a través de la plataforma de la revista.

NUEVAS PRESENTACIONES

Las presentaciones de trabajos a esta revista y su proceso de revisión se llevan a cabo totalmente en línea. Se recomienda a los autores tener en cuenta los siguientes puntos

Revisión por pares

El editor evaluará inicialmente todas las contribuciones para determinar su idoneidad para la revista. Los documentos que se consideran adecuados se envían normalmente a un mínimo de dos revisores expertos independientes para evaluar la calidad científica/tecnológica del documento. El Editor es responsable de la decisión final con respecto a la aceptación o rechazo de artículos. La decisión del editor es final e inapelable.

Uso de software de procesamiento de textos

Independientemente del formato de archivo del envío original, para una adecuada revisión se nos debe proporcionar un archivo editable de todo el artículo. Mantenga el diseño del texto lo más simple posible. La mayoría de los códigos de formato serán eliminados y reemplazados al procesar el artículo. El texto electrónico debe prepararse de una manera muy similar al formato ejemplo disponible en la WEB) Para evitar errores innecesarios, se recomienda encarecidamente utilizar las funciones de "revisión ortográfica" y "verificación gramatical" de su procesador de texto.

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO

Subdivisión: secciones numeradas

Divida su artículo en secciones numeradas y claramente definidas. Las subsecciones deben numerarse 1.1 (luego 1.1.1, 1.1.2,...), 1.2, etc. (el resumen no está incluido en la numeración de las secciones). Use esta numeración también para las referencias cruzadas internas, es decir no solo se refiera a 'el texto'. Cualquier subsección puede recibir un breve encabezado. Cada título debe aparecer en una línea separada.

Página de título

- **Título.** Conciso e informativo. Los títulos se usan a menudo en sistemas de recuperación de información. Evite abreviaturas y fórmulas cuando sea posible. Evite nombres conocidos solo en un contexto definido.
- **Nombres de los autores y afiliaciones.** Indique claramente el (los) nombre (s) y apellido (s) de cada autor y verifique que todos los nombres estén escritos con precisión. Presente las direcciones de afiliación de los autores (institución u organismo donde se realizó el trabajo real, en tanto aplique) debajo de los nombres. Indique todas las afiliaciones con una letra superíndice minúscula inmediatamente después del nombre del autor y frente a la dirección correspondiente. Proporcione la dirección postal completa de cada afiliación, incluido el nombre del país y, si está disponible, la dirección de correo electrónico de cada autor.
- **Autor de correspondencia.** Indique claramente quién manejará la correspondencia en todas las etapas de arbitraje y publicación, también después de la publicación. Por ejemplo un * a continuación del nombre del autor de correspondencia y una nota posterior que indique "Autor de correspondencia" sería adecuado. Es deseable que el autor por correspondencia sea el responsable de cargar los documentos en la plataforma virtual de la RIOCI. Esto asegura una más fluida comunicación. Asegúrese que el autor de correspondencia proporcione una dirección de correo electrónico y mantenga actualizados los datos de contacto en la plataforma de la RIOCI.

Resumen

Se requiere un resumen conciso y real. El resumen debe indicar brevemente el propósito de la investigación, los resultados principales y las principales conclusiones. Un resumen a menudo se presenta por separado del artículo, por lo que debe ser capaz de ser independiente. Por esta razón, las referencias deben evitarse. Además, se deben evitar las abreviaturas no estándar o poco comunes, pero si son esenciales, deben definirse en su primera mención en el mismo resumen. **Un resumen no debiese exceder de 1800 caracteres (incluido los espacios).** El resumen debe escribirse en un correcto inglés y castellano, siendo el primero el idioma del cuerpo del manuscrito.

Palabras clave

Inmediatamente después del resumen, proporcione un máximo de 4 palabras clave, utilizando la ortografía estadounidense y castellana. Evite los términos generales, plurales y múltiples conceptos (evite, por ejemplo, "y", "de"). Séa respetuoso con las abreviaturas: solo las abreviaciones firmemente establecidas en el campo pueden ser elegibles. Estas palabras clave se usarán con fines de indexación.

Introducción

Indique los objetivos del trabajo y proporcione un trasfondo adecuado, evitando una encuesta bibliográfica detallada o un resumen de los resultados. Debe aportar los antecedentes teóricos que justifican el objetivo del trabajo y especifican el punto de partida del conocimiento respecto del problema u oportunidad que desea abordar.

Teoría

Una nueva sección de carácter teórico debe ampliar no repetir, el fondo del artículo ya tratado en la Introducción y sentar las bases para el trabajo posterior. Una nueva sección de teoría será aplicable ante la necesidad de proporcionar mayores antecedentes que precisen la temática que se abordará.

Materiales y/o métodos o metodología

Proporcione suficientes detalles para permitir que el trabajo sea reproducido por un investigador independiente. Los métodos que ya están publicados deben resumirse e indicarse mediante una referencia. Si cita directamente (literalmente) de un método publicado previamente, use comillas y también cite la fuente. Cualquier modificación a los métodos existentes también debe describirse.

Los Resultados

Los resultados son el producto de haber aplicado los métodos y/o materiales expuestos previamente. La presentación de los resultados debe ser clara y concisa. Evite la explicación detallada del procesamiento de la información. Tenga en cuenta que sus resultados deben ser expuestos en el espacio limitado. Solo en los casos justificados tablas de más de una página serán permitidas.

Discusión

Esto debería explorar la importancia de los resultados del trabajo, no repetirlos. Una sección combinada de Resultados y Discusión a menudo es apropiada. Evite citas extensas y discusiones sobre literatura ya publicada.

Conclusiones

Las principales conclusiones del estudio que dan respuesta a su objetivo pueden presentarse en una breve sección de Conclusiones. Además, asegure se indicar el aporte científico /tecnológico de la investigación (novedad y utilidad del artículo) y futuras líneas de trabajo que podrían derivarse de su aporte.

Reconocimientos

Intercalar los reconocimientos en una sección separada al final del artículo antes de las referencias. Por lo tanto evite incluir agradecimiento o reconocimientos en la página del título, como una nota al pie del título o de otro modo. En esta sección las fuentes de financiamiento pueden ser incorporadas. Para ello emplee el siguiente formato.

Este trabajo fue apoyado por los Institutos Nacionales de Salud [números de concesión xxxx, yyyy]; la Fundación Bill & Melinda Gates, Seattle, WA [número de concesión zzzz]; y los Institutos de Paz de los Estados Unidos [número de concesión aaaa].

Referencias y citaciones

• Citación en el texto

Asegúrese de que cada referencia citada en el texto también esté presente en la lista de referencias (y viceversa). Los resultados no publicados y las comunicaciones personales no se recomiendan en la lista de referencias, pero pueden mencionarse en el texto. Si estas referencias se incluyen en la lista de referencia, deben seguir el estilo de referencia estándar de la revista y deben incluir una sustitución de la fecha de publicación por "Resultados no publicados" o "Comunicación personal". La cita de una referencia como 'en prensa' implica que un artículo aún no publicado ha sido aceptado para su publicación.

Todas las citas en el texto deben referirse a:

1. *Autor único*: el nombre del autor (sin iniciales, a menos que exista ambigüedad) y el año de publicación;
2. *Dos autores*: los nombres de ambos autores y el año de publicación;
3. *Tres o más autores*: primer nombre del autor seguido de 'et al.' y el año de publicación.

Las citas pueden incluirse en la narrativa (por ejemplo Kramer et al. (2010) han mostrado recientemente...') o hacerse entre paréntesis (por ejemplo 'como se demostró (Allan, 2000a, 2000b; Allan y Jones, 1999)').

Por cada citación se recomienda no incluir más de tres citas.

Si se identifican más de una referencia del mismo autor (es) con el mismo año, se deben incluir las letras "a", "b", "c", etc., colocadas después del año de publicación.

• Formato del listado de referencia

En general son aceptadas listas de referencias basadas en la norma APA; sin embargo no hay requisitos estrictos sobre el formato de referencia en la presentación, debiendo ser coherente en todo el manuscrito. De cualquier forma se recomienda evitar los modelos Vancouver u otros que presentan las referencias asociadas a un número correlativo en el cuerpo del manuscrito.

Las listas de referencias deben organizarse primero alfabéticamente y luego ordenarse cronológicamente si es necesario.

Un estilo de referencia adecuado para RIOCI es:

Nombre (s) del autor (es) <Apellido, inicial del nombre;...>, año de publicación, título del capítulo / título del artículo, título de la revista / título del libro, número de volumen (número de edición), pág. inicial – pág. final, DOI

Ejemplos:

Referencia a una publicación de revista:

Van der Geer, J.; Hanraads, J.A.; Lupton, R.A., 2010. El arte de escribir un artículo científico. J. Sci. Commun. 163, 51-59.

Referencia que usa DOI para un artículo que aún no está publicado:

VanDecar, J.C.; Russo, R.M.; James, D.E.; Ambeh, W.B.; Franke, M., 2003. Continuación sísmica de la losa de las Antillas Menores bajo el noreste de Venezuela. Journal of Geophysical Research. En prensa. <https://doi.org/10.1029/2001JB000884>

Referencia a un libro:

Strunk Jr., W.; White, E.B. 2000. The Elements of Style, 4ta Ed. Longman, Nueva York.

Referencia a un capítulo en un libro editado:

Mettam, G.R.; Adams, L.B.; 2009. Cómo preparar una versión electrónica de su artículo, en: Jones, BS, Smith, RZ (Eds.), Introducción a la era electrónica. E-Publishing Inc., Nueva York, pp. 281-304.

Referencia a un sitio web:

Cancer Research UK, 1975. Reportes de estadísticas de cáncer para el Reino Unido. Disponible en <http://www.cancerresearchuk.org/aboutcancer/statistics/cancerstatsreport/> (consultado el 13 de marzo de 2003).

Referencia a un conjunto de datos:

[conjunto de datos] Oguro, M.; Imahiro, S.; Saito, S.; Nakashizuka, T., 2015. Datos de mortalidad de la enfermedad del marchitamiento del roble japonés y las composiciones de los bosques circundantes. Mendeley Data, v1. <https://doi.org/10.17632/xwj98nb39r.1>.

ELEMENTOS DEL ARTÍCULO

Abreviaturas

Defina abreviaturas que no son estándar en este campo solo la primera vez que esta sea usada en el cuerpo del documento. Asegure la consistencia de las abreviaturas en todo el artículo.

Fórmulas matemáticas

Envíe ecuaciones matemáticas como texto editable y no como imágenes. Presente fórmulas simples en línea con el texto normal siempre que sea posible y utilice (/) en lugar de una línea horizontal para términos fraccionarios pequeños, por ejemplo, X / Y. En principio, las variables deben presentarse en cursiva. Numerar consecutivamente todas las ecuaciones que deben mostrarse por separado del texto entre paréntesis y asegurar que cada ecuación sea citada en el cuerpo del documento.

Notas al pie

Las notas al pie deben usarse con moderación. Numerarlos consecutivamente a lo largo del artículo. Muchos procesadores de texto crean notas al pie en el texto, y esta característica puede ser utilizada. Si este no fuera el caso, indique la posición de las notas a pie de página en el texto y presente las notas al pie de página por separado al final del artículo.

Figuras y tablas incrustadas en el texto

Asegúrese de que las figuras y las tablas incluidas en el archivo único se coloquen junto al texto relevante en el manuscrito, en lugar de en la parte inferior o superior del archivo. El título correspondiente debe colocarse directamente debajo de la figura o tabla. Cada tabla y figura deberán contar con un número identificador a través del cual debe estar citado en el cuerpo del manuscrito. El orden de presentación de cada figura en el cuerpo del documento debe ser consistente en su aparición; es decir no puede mencionarse la Figura 2 si antes no ha sido mencionada la Figura 1. Esta situación es análoga para la mención de Tablas y Ecuaciones.

Ilustraciones

Las ilustraciones pueden incluir gráficos, dibujos lineales, esquemas, diagramas y fotografías. Deben numerarse en forma secuencial, en el mismo orden en que son referenciadas en el texto como: figura 1, figura 2, etc. El título debe presentarse bajo la figura. Evite emplear Ilustraciones optimizadas para el uso de la pantalla (resolución muy baja) y evite gráficos que sean desproporcionadamente grandes para el contenido.

Leyendas de las figuras

Asegúrese de que cada ilustración tenga al menos un título. Una figura debe incluir un título breve (no en la misma figura). Figuras compuestas emplearán letras minúsculas para diferenciarlas (Por ejemplo Figura 3a, Figura 3b...). Cada parte de una figura compuesta debe estar mencionada en el cuerpo del manuscrito. Por su parte, el texto en la ilustración (en el interior de la figura) podrá emplear tamaño mínimo y explicará todos los símbolos y abreviaturas utilizados.

Tablas

Por favor envíe las tablas como texto editable y no como imágenes. Es recomendable que las tablas se adjunten al texto relevante en el artículo. Numere las tablas consecutivamente de acuerdo con su apariencia en el texto y coloque las notas de la tabla debajo del cuerpo de la tabla. Emplea las tablas responsablemente y asegúrese de que los datos presentados en ellas no dupliquen los resultados descritos en otra parte del artículo. Evite el uso de reglas verticales y sombreado en las celdas de la tabla.

Material suplementario

El material suplementario, como aplicaciones, imágenes y conjuntos de datos, se puede publicar con su artículo para mejorarlo. Los artículos suplementarios enviados se publican exactamente tal como se reciben (los archivos Excel o PowerPoint aparecerán como tales en línea). Por favor, envíe su material junto con el artículo y proporcione un título descriptivo y conciso para cada archivo suplementario. Si desea realizar cambios en el material suplementario durante cualquier etapa del proceso, asegúrese de proporcionar un archivo actualizado. Desactive la opción "Control de cambios" en los archivos de Microsoft Office ya que estos aparecerán en la versión publicada.

DESPUES DE LA ACEPTACION

Corrección de pruebas

Los autores correspondientes recibirán un correo electrónico con la presentación borrador de la prueba de impresión de su manuscrito. En un plazo establecido los autores podrán solicitar enmiendas sobre la prueba de impresión. Trascurrido dicho plazo sin pronunciamiento del autor de correspondencia se considera que la prueba es aceptada para su impresión. El autor debe tener en cuenta potenciales errores de edición asociados a la composición tipográfica, la integridad, la corrección del texto, las tablas y figuras.

Es importante asegurarse de que todas las correcciones nos sean enviadas en una sola comunicación. Verifique cuidadosamente antes de responder, ya que no se puede garantizar la inclusión de correcciones posteriores. En esta instancia la revisión es exclusivamente su responsabilidad.



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

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

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

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

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

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





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

