

RIOC

REVISTA INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA

Facultad
de Ingeniería
& Ciencias





Establecer lazos de confianza y de colaboración con diferentes actores de la sociedad, es clave para levantar propuestas de investigación orientadas a contribuir al desarrollo local y global.

Con esa mirada, se gesta la revista de Ingeniería de Obras Civiles (RIOC), del Departamento de Ingeniería de Obras Civiles de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de nuestra Universidad, una publicación que hoy día se vanagloria de contar con su séptimo número.

Con participación de investigadores de nuestro país y del extranjero, esta nueva edición de RIOC se consolida como un valioso espacio para difundir trabajos y estudios que abarcan distintos ámbitos de la construcción, un campo de investigación que hoy orienta sus esfuerzos a desarrollar nuevo conocimiento en materia de optimización del uso de recursos, utilización de nuevas tecnologías, materiales sustentables y métodos de construcción.

Sin duda, este es un campo de estudio fecundo para abordar desde el punto de vista científico-tecnológico, donde la colaboración y alianza entre investigadores e instituciones afines se alza como la base para alcanzar el desarrollo y bienestar que la comunidad demanda en un escenario cada vez más complejo y globalizado.

Esa es la gestión hacia la cual debemos propender nuestras acciones, en el entendido de que todos somos partes de una institución de educación superior pública y estatal, que busca impactar, desde las áreas que la competen, en el crecimiento económico y social de la región y país.

Dr. Eduardo Hebel Weiss
Vicerrector de Investigación y Postgrado
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, RIOCI proporciona un espacio para compartir y divulgar conocimientos, de manera tal, de abrir la discusión en estas temáticas planteadas, entregando información esencial que ayudará a mejorar la eficiencia, la productividad y la competitividad en los profesionales del área de la construcción. Por lo tanto, es una lectura esencial para proporcionar a los profesionales del área, académicos y alumnos que trabajan e investigan en este campo, un material de discusión que renueve y actualice sus conocimientos.

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

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



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



Director
Gonzalo Valdés

Editora Responsable
Viviana Letelier

Editores de Producción
Camila Parodi
Javier Vidal
Daphne Bormann

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.

Ph.D. Gonzalo Valdés
Departamento Ingeniería de Obras Civiles, Universidad de La
Frontera, Temuco, Chile.

Ph.D. Mario Salazar
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana, Morelia,
México.

Ph.D. Oscar Reyes
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada,
Bogotá, Colombia.

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.** Delimitación de susceptibilidad ante peligro volcánico mediante teledetección: Caso de la Isla Fogo utilizando primeros resultados de la misión Sentinel 1A.
Delimitation of susceptibility to volcanic hazard by remote sensing: Case Fogo Island using first results of the Sentinel 1A mission.
Daniela Ledezma, Vania Aguilera, Margot Quiriban, Ivo Fustos.
- 16.** Water Hammer Analysis using a Hybrid Scheme
Análisis del Golpe de Ariete usando un Esquema Híbrido
John Twyman.
- 26.** Estudio de la variación del módulo dinámico y la fatiga en mezclas asfálticas densas hechas con diferentes tipos de asfalto y agregado.
Study of variation of the dynamic modulus and fatigue life in dense asphalt mixtures made with different types of asphalt and aggregate.
Rey Adame, Jorge Alarcón, Pedro Limón, Israel Sandoval, Ignacio Cremades.
- 37.** Prefeasibility Study for a Continuous-Production Carbon Nanotube Plant in Bogota and Suburban Areas.
Estudio de prefactibilidad de una planta, para la producción continua de nanotubos de carbono en Bogotá y municipios aledaños.
Fredy Reyes, Iván Sequera, Didier Pinzón.



Delimitación de susceptibilidad ante peligro volcánico mediante teledetección: Caso de la Isla Fogo utilizando primeros resultados de la misión Sentinel 1A.

Delimitation of susceptibility to volcanic hazard by remote sensing: Case Fogo Island using first results of the Sentinel 1A mission.

Daniela Ledezma¹, Vania Aguilera², Margot Quiriban², Ivo Fustos²

¹ Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Católica de Temuco, Chile.

² Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Frontera, Chile.
dledezma2013@alu.uct.cl, Teléfono: +56-9-46426207.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
04-11-2016
Aceptado
18-08-2017
Publicado
17-10-2017

Palabras Clave:
Isla Fogo
Interferometría
Sentinel 1A
Riesgo Volcánico

Article history:

Received
04-11-2016
Accepted
18-08-2017
Available
17-10-2017

Keywords:
Fogo Island
Interferometry
Sentinel 1A
Volcanic risk

Resumen

La isla Fogo, ubicada en el archipiélago de Cabo Verde (14°55'3" N, 23°30'32"W), posee un estratovolcán activo asociado a un volcanismo intraplaca. Con base en imágenes satelitales microondas y posterior análisis interferométrico, se observaron deformaciones provocadas por el último evento eruptivo y con el fin de poder integrar esta técnica con antecedentes recopilados del área de estudio, se delimitaron zonas de riesgos permitiendo generar un mapa exploratorio preliminar. Resultados iniciales muestran que los patrones de deformación observados son consistentes a procesos de falla producto de la tectónica local (patrón de "mariposa"). Además, permitieron establecer una relación entre peligrosidad, riesgo y vulnerabilidad de una erupción para la zona de estudio, donde se muestra finalmente una delimitación de los riesgos. Cabe destacar que se necesita de mayor información del lugar para poder hacer una delimitación de riesgos de forma óptima, eficiente y concluyente, producto de algunos errores que se puedan observar en el mapa exploratorio. Esto podría ser subsanado a través de un análisis satelital más robusto y nuevos datos in situ detallados del lugar. A partir de los interferogramas, se pudo definir el control estructural permitiendo delimitar la susceptibilidad que presenta esta isla ante los riesgos que puede producir este volcán. Finalmente, este caso de estudio permite mostrar que el conocimiento generado a partir de técnicas remotas puede ser transferido a análisis de casos de estudio en territorio nacional, lo cual permitirá mitigar riesgos y desarrollar planes de emergencia en base a los patrones históricos de conducta del volcán, observados a través de satélite.

Abstract

Fogo Island, located in the archipelago of Cape Verde (14 ° 55'3 "N, 23 ° 30'32" W), possesses an active stratovolcano associated with an intraplate volcanism. Based on satellite images microwave and subsequent interferometric analysis, deformations caused by the last eruptive event were observed, and in order to integrate this technique with background data collected from the study area, risk areas were delimited allowing the generation of a preliminary exploratory map. Initial results show that the observed deformation patterns are consistent with faulting processes produced by local tectonics ("butterfly" pattern). In addition, they allowed to establish a relation between hazard, risk and vulnerability of a volcanic eruption for the study area, where a risk definition is finally shown. It is necessary to obtain more information of the place to delimit the risks in an optimal,



efficient and conclusive level, product of some errors that can be observed in the exploratory map. This could be remedied through more robust satellite analysis, and new in-situ detailed data. From the interferograms, it was possible to define the structural control allowing to delimit the susceptibility that presents this island before the risks that can produce this volcano. Finally, this case study shows that the knowledge generated from remote techniques can be transferred to case studies analysis in the national territory, which will mitigate risks and develop emergency plans based on the historical patterns of behavior of the volcano, observed through satellite.

1. Introducción.

El daño material que pueden generar los productos de una erupción volcánica muchas veces no es conocido debido a la falta de evidencia histórica del lugar. Ejemplos de lo anterior han sido reportados en la zona sur de Sudamérica tales como el Volcán Chaitén [15]; Nevado de Longaví [23]. Normalmente en países en vías de desarrollo, la vigilancia volcánica queda limitada por recursos económicos o capital humano capacitado [12]. En dicho contexto, el uso de sensores remotos en los últimos años ha posibilitado comprender de mejor manera la geodinámica de los procesos eruptivos. Casos destacables pueden ser zonas con presencia de volcanismo intraplaca, en la cual existe un ascenso de material magmático procedente del manto, el cual termina formando hot-spots [5].

Normalmente, los hot-spots son capaces de generar islas asociadas a actividad volcánica intraplaca, dentro de la que destaca la Isla Fogo ubicada en el Atlántico frente a las costas de África (**Figura 1**). La mayoría de las islas volcánicas generan inconvenientes en la seguridad de la población adyacente (ejemplos de casos lo menciona Carracedo et. al., en la Isla Tenerife) [4]. Islas ubicadas en países en vías de desarrollo no poseen mapas que permitan evaluar el riesgo que corre la población producto de la actividad volcánica de la isla. De esta manera, es de vital importancia comenzar a generar estrategias de zona de riesgo, recopilando información que evidencie el peligro que puede provocar la actividad efusiva de un volcán. En condiciones de actividad volcánica de intraplaca, utilizar sensores remotos permite monitorear procesos eruptivos permitiendo cubrir espacio-temporalmente la zona sin la necesidad de incurrir en gastos logísticos elevados ni comprometer vidas humanas. En ese sentido se propone utilizar como caso de estudio el proceso eruptivo del volcán Pico do Fogo para generar un mapa de riesgo que permita entregar mejores herramientas de planificación territorial.

En el presente trabajo se estudia el proceso eruptivo de la Isla Fogo, ubicada en la República de Cabo Verde. Esta isla es la más característica de esta república, ya que presenta un estratovolcán

activo denominado Pico do Fogo que registra actividad desde el siglo XV y, que hasta entonces, no ha cesado. Por lo cual mediante imágenes satelitales microondas y análisis interferométricos, se observará la deformación provocada por el último periodo eruptivo registrado el 23 de noviembre del 2014 hasta el 8 de febrero del 2015. Para esto, se realizarán técnicas de interferometría con radar de apertura sintética (InSAR), con el fin de poder integrar esta técnica con antecedentes recopilados del área de estudio, delimitar zonas de riesgo y poder generar un mapa exploratorio de riesgo. Esta técnica consiste en utilizar dos imágenes obtenidas por un radar de apertura sintética (SAR) adquiridas de la misma región en dos posiciones temporalmente diferentes, lo que permite detectar diferencias en la elevación topográfica y/o deformaciones que hayan ocurrido en el lugar [3]. Estudios como el de Gonzales et. al. [11], donde se propone esta misma técnica para su estudio de evaluación de deformaciones en esta misma zona, serán utilizados como referencia para el desarrollo de este estudio.

2. Zona de estudio.

Fogo es una de las islas ubicadas en el Archipiélago de Cabo Verde en el Océano Atlántico, al noroeste de África (14°55'0" N, 24°25'0" W, **Figura 1**). El sistema corresponde a un estratovolcán con una caldera de 9 km de ancho, con volcanismo explosivo y magmas de tipo basáltico. Esta isla presenta cuatro estructuras geológicas bien definidas: 1) El antiguo estratovolcán Monte Amarelo que condiciona la actual morfología de la isla, 2) La posterior caldera de deslizamiento de su flanco E que deja un anfiteatro de unos 20 km de perímetro y paredes subverticales de hasta 1.000 m de desnivel (denominado como Bordeira), 3) El citado estratovolcán de Pico do Fogo anidado en el interior de esta caldera y una meseta casi plana entre ambas estructuras llamada Chã das Caldeiras formada por el relleno de materiales volcánicos proveniente de Pico do Fogo, y, 4) Conos satélites que chocan y se acumulan contra Bordeira. La evolución geológica de Pico do Fogo sigue las secuencias típicas de volcanismo intraplaca con un crecimiento muy rápido [19].



Figura 1. Mapa de la zona de estudio creado para este estudio.

La zona posee tres sistemas de fallas principales con direcciones tectónicas NW-SE, NE-SW y N-S (Figura 2). También se puede encontrar un patrón de fractura radial, relacionado con el estratovolcán central. El sistema de falla N-S está bien expresado por una alineación clara de los conos a lo largo de la Zona de Falla Sambango-Monte Vermelho, la cual puede haber controlado el colapso de los flancos de Fogo. En Chã das Caldeiras se identificaron varias fallas, algunas de ellas relacionadas con la erupción de 1995. Una de las más espectaculares es la falla Boca Fonte del NW-SE que se puede observar en el escarpe de falla de Bordeira. Esta falla presenta una rotura superficial corta (en uno de los centros eruptivos iniciales) y está alineado con el escarpe sur de falla S. Jorge. La falla de Monte Beco, también involucrado en el evento de 1995, representa el sistema de tendencias NE-SW [2].

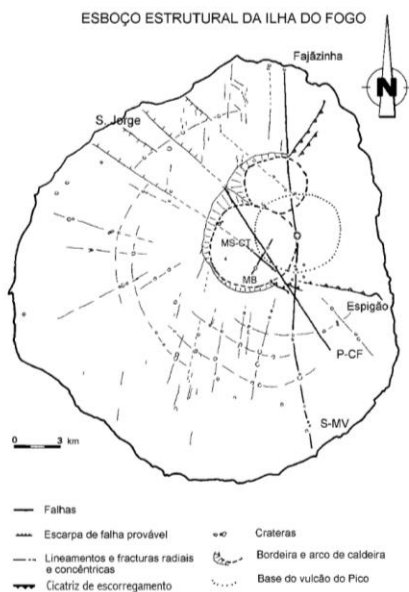


Figura 2. Estructura de la Isla Fogo. Fuente: Brum da Silveira et al., 1997.

El volcán posee registros de episodios eruptivos desde el año 1680, lo que produjo que muchos habitantes emigraran a islas vecinas. En 1785 se produjo una erupción que hizo que la isla creciera debido a los depósitos de lava que se produjeron en la zona noreste de la isla. Luego, en los años 1799, 1847, 1852, 1857, 1951 y 1995 se produjeron nuevos eventos eruptivos (Figura 3), pero menos significativos y explosivos. El 23 de noviembre del 2014, después de 19 años de inactividad, este volcán volvió a entrar en erupción. Fue de tal magnitud que las lavas afectaron viviendas, destruyeron la mayoría de las zonas de cultivo, dañaron antenas de comunicación y cortaron carreteras.

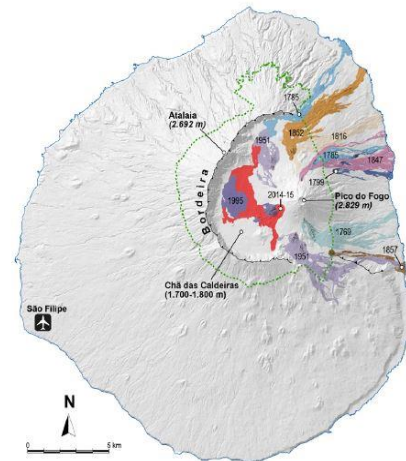


Figura 3. Mapa de la zona donde se registran las erupciones históricas y sus estructuras geológicas más relevantes. Fuente: Perez-Torrado et al., 2015.

3. Metodología.

Con el objetivo de delimitar las zonas y generar un mapa de riesgo, se integrará evidencia de datos de sensores remotos con antecedentes in situ de la zona de estudio. Dentro de los datos de sensores remotos, se desea observar la morfología de la zona y deformaciones que pueda presentar este volcán. Para los antecedentes in situ se analizarán los registros históricos que presenta la isla, como coladas de lavas históricas, además de relieve y pendiente. A partir de lo anterior, se recopilaron imágenes satelitales SAR del satélite Sentinel 1A, con datos de longitud de onda de 5.2 cm, en la fase previa a la erupción (3 de noviembre del 2014) y en la fase de término de ésta (2 de enero del 2015), con el fin de analizar y observar las deformaciones ocurridas durante la erupción para así integrar esta evidencia con erupciones pasadas y realizar un mapa de riesgo.

Las imágenes SAR obtenidas deben pasar por diferentes procesos para poder crear interferogramas. Este procesamiento se realiza por medio del software SNAP (Sentinel Application Platform), con el fin de precisar con mayor detalle los elementos de deformación



presentes en la isla. La configuración interferométrica InSAR explota la diferencia de fase entre dos observaciones de radar SAR complejas tomadas de posiciones ligeramente diferentes del sensor, extrayendo la información acerca de la superficie de la tierra. Esta información se recoge desde satélites en órbita. Para este caso se utiliza el satélite Sentinel 1A que posee un sensor SAR en banda C que ofrece imágenes de media y alta resolución en todas las condiciones climáticas; esta se encuentra en una órbita polar, sincrónica al sol, lo cual le permite adquirir datos tanto en nodos ascendentes (de sur a norte) como descendentes (de norte a sur). Este tiene como por objetivo principal el monitoreo terrestre y de los océanos [9].

La realización del interferograma en el programa SNAP está formulado por la multiplicación cruzada de una imagen seleccionada como maestra con el resto de imágenes denominadas esclavas, esto debido a las imágenes obtenidas de las órbitas ascendentes y descendentes (**Tabla 1**). Luego se procede a la corrección de la imagen, donde se asegura que cada objetivo terrestre contribuye a la misma, ya sea el rango o azimut del píxel, tanto en la imagen esclava como en la maestra. Luego se realiza el interferograma de las imágenes ajustadas, lo cual necesita de correcciones, dado que dentro de un subswath, cada ráfaga se encontrará separada por una zona de demarcación, en la cual los datos dentro de esta zona pueden conducir a errores. Es por esto que se realiza la corrección de línea, que básicamente consiste en considerar estos valores como nulos e inválidos, juntando cada ráfaga en un subswath. Una vez realizado este procedimiento, el interferograma pasa por un proceso de aplanamiento mediante la eliminación de la fase topográfica que este presenta. Se simula un interferograma basado en un Modelo de Elevación Digital (DEM) de referencia que se resta del interferograma procesado. El producto de este procedimiento resulta en un interferograma con fase topográfica eliminada y una banda para la fase topográfica. Durante esta técnica, el interferograma puede ser perturbado por el ruido de alguna descorrelación temporal o geométrica, volumen de dispersión o procesamiento de error. Por lo cual se procede a realizar una fase de filtro. Para desenvolver de mejor manera esta fase, la relación señal-ruido se incrementa mediante el filtrado de la fase [9][16][17].

Tabla 1. Tipo de órbita donde se obtuvieron las diferentes de imágenes.

| FECHA IMAGEN MAESTRA | FECHA IMAGEN ESCLAVA | TIPO DE ÓRBITA |
|----------------------|----------------------|----------------|
| 3 de noviembre 2014 | 27 de noviembre 2014 | Ascendente |
| 8 de noviembre 2014 | 2 de diciembre 2014 | Descendente |

| | |
|----------------------|-------------|
| 9 de diciembre 2014 | Ascendente |
| 11 de diciembre 2014 | Ascendente |
| 14 de diciembre 2014 | Descendente |
| 2 de enero 2015 | Ascendente |

Para realizar un mapa de riesgo, según como lo establece el Instituto Geográfico Nacional, se define riesgo como la expectativa de que se produzcan pérdidas de vidas humanas, bienes materiales o capacidad productiva debido a la actividad volcánica de la isla. Estos peligros volcánicos corresponden a flujos piroclásticos, lava, lahares, dirección y caída de ceniza, además de rasgos topográficos como pendiente y morfología del terreno. Estos riesgos por lo general no constituyen un grave problema a más de 30 km de la fuente. El concepto de peligrosidad volcánica engloba todo el conjunto de eventos que se pueden esperar en un determinado volcán y que pueden provocar daños a personas o bienes expuestos. Por este motivo, generalmente, en un área volcánica activa se elabora un mapa de peligrosidad por cada uno de los peligros esperables en dicha área.

Finalmente, el riesgo se evaluó como el producto de tres factores: valor, vulnerabilidad y peligrosidad, ocupando la siguiente fórmula propuesta por el Instituto Geográfico Nacional:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Valor}$$

Donde la peligrosidad se define como la probabilidad de que un lugar, durante un intervalo de tiempo determinado, sea afectado por un determinado evento. La vulnerabilidad es la expectativa de daño o pérdida sobre un determinado elemento expuesto. Y el valor representa la cuantificación, en términos de vidas humanas, de coste, etc. de los elementos susceptibles de ser afectados por el evento.

Para poder realizar todos estos principios, ocupando Quantum Gis 2.8.8 y ArcGis 10.1, se formularon diferentes capas para englobar la peligrosidad, vulnerabilidad y valor. Para los factores de peligrosidad se generaron capas de coladas de lava históricas presentes a los alrededores del volcán. Para los factores vulnerabilidad se generaron capas de pendiente y relieve del volcán, adhiriendo además el interferograma que se obtuvo. Finalmente, para los factores de valor o factor social, se generaron capas de uso de suelo. Una vez generadas las capas, utilizando el programa ArcGis 10.1, se continúa realizando la fórmula descrita anteriormente, mediante álgebra de mapas, ocupando la calculadora ráster.

4. Resultados.

4.1 Interferometría

Aplicando las técnicas necesarias para poder realizar los diferentes interferogramas en el programa SNAP, se obtuvieron seis interferogramas representados como mapas de la misma zona (**Figura 4**), estudiados en diversos períodos pre eruptivo y eruptivo comprendidos entre noviembre del 2014 y enero del 2015. Como se mencionó en la metodología, se toman dos imágenes maestras correspondientes al 3/11/2014 y 08/11/2014, de órbita ascendente y descendente respectivamente, que finalmente nos permitirá trabajar con las imágenes esclavas de misma órbita que las maestras (**Tabla 1**).

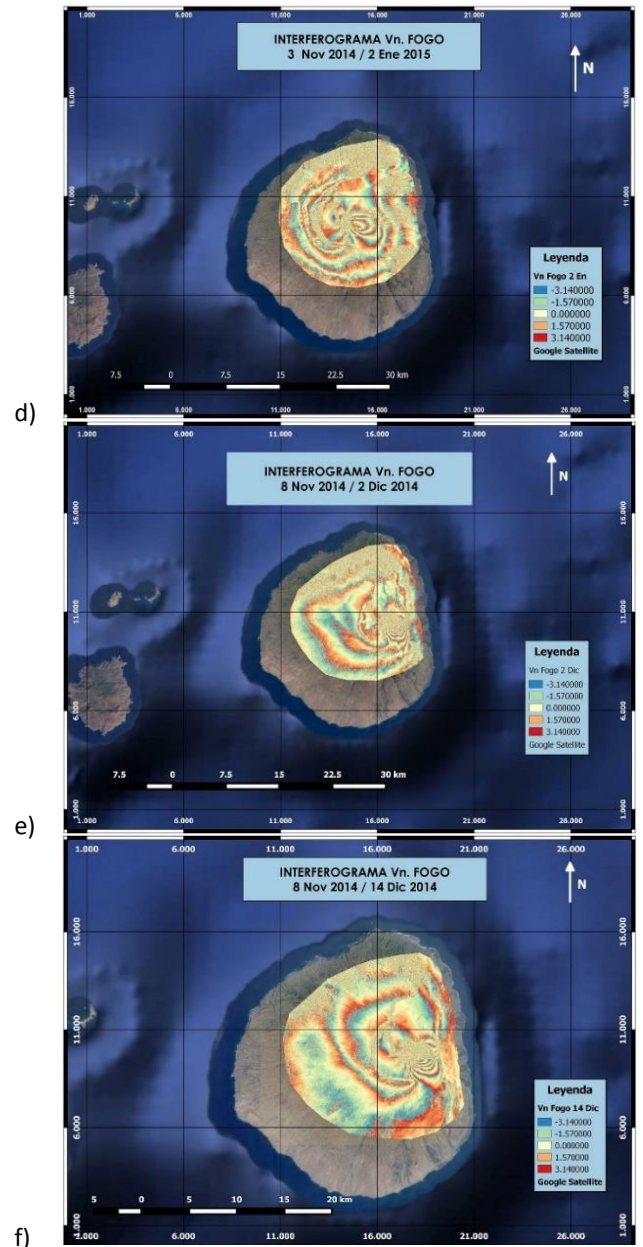
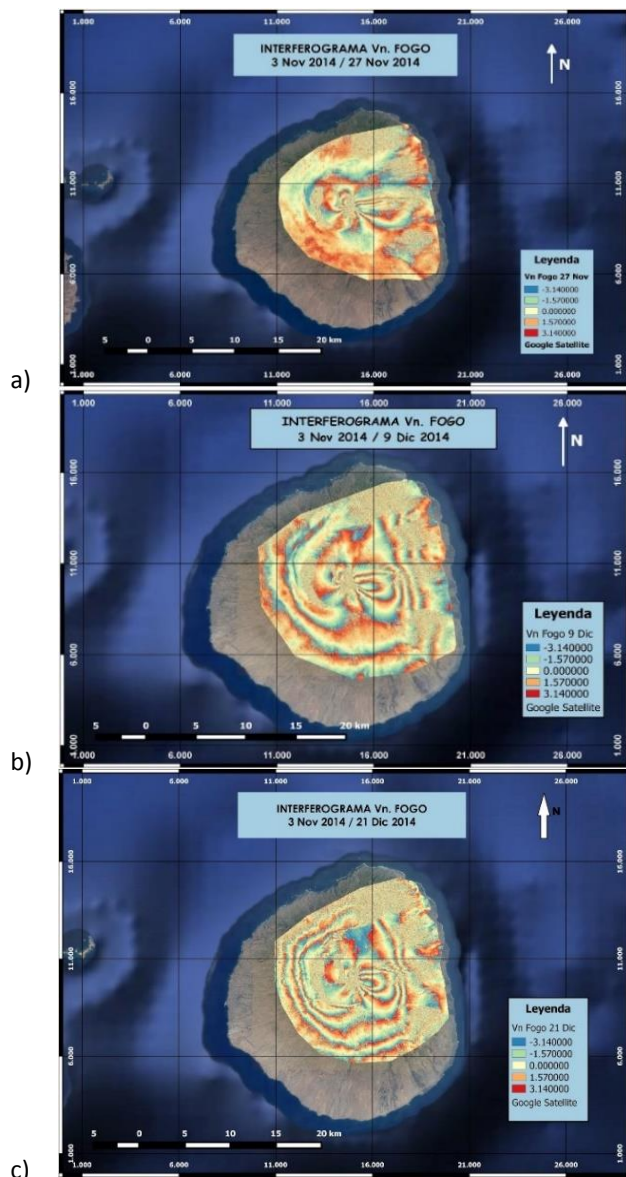


Figura 4. Mapas referenciales, donde se aprecia el interferograma del Volcán en diferentes fechas: (a) Entre las fechas 3/11/14 y 27/11/14. (b) Entre las fechas 3/11/14 y 9/12/14. (c) Entre las fechas 3/11/14 y 21/12/14. (d) Entre las fechas 3/11/14 y 2/01/15. (e) Entre las fechas 8/11/14 y 2/12/14. (f) Entre las fechas 8/11/14 y 14/12/14.

La morfología de los interferogramas nos indica una tendencia en forma de lóbulos en la sección central del volcán. En los mapas b, c y d, las franjas de interferencia (fringes) se encuentran bien definidos apreciándose la forma de este lóbulo. Sin embargo, el mapa (c) posee fringes más intensificados, tanto en definición de límites como en número de repetición. Estos lóbulos son llamados coloquialmente “mariposa”, los que varían en tamaño,

mostrando una clara disminución en el mapa (d). Los mapas (e y f) muestran un desplazamiento de esta "mariposa" hacia el lado este del volcán. Este desplazamiento se produce porque las imágenes fueron procesadas con distinta órbita (Tabla 1). En la imagen (f), la estructura del interferograma está difusa, por lo que difícilmente se aprecia la "mariposa" y los fringes.

Cabe destacar que en todos los mapas se observan regiones con baja coherencia espacial atribuibles a ruidos o errores espaciales en la medición (ejemplo en zona norte del mapa c). No obstante, las zonas con ruido varían levemente, observándose mayor ruido en los mapas (d y e), respecto a las demás.

4.2. Delimitación del riesgo volcánico.

Una vez obtenidos los interferogramas, se delimitó la susceptibilidad ante un peligro volcánico. Se generaron modelos para englobar la peligrosidad, vulnerabilidad y valor. Para la peligrosidad se obtuvo una capa de coladas de lava históricas presentes en los alrededores del volcán. Para vulnerabilidad se obtuvieron capas de pendiente, relieve del volcán, adhiriéndole un interferograma. Finalmente, para el valor o factor social, se generaron capas de uso de suelo. Debido a lo anterior, se consideran aquellas zonas susceptibles a contacto con flujos de lava, teniendo en cuenta además pendientes abruptas, fisuras actuales y cercanías a centros poblados.

Una vez procesada esta información, se obtuvo un esquema de riesgo volcánico (Figura 5), y que en el cual se proponen cuatro zonas de riesgo catalogadas para el Volcán Fogo las que corresponden a Zona de Riesgo Alto (Rojo), encontrada a los alrededores del volcán y que indican zonas susceptibles a pendientes abruptas, fisuras actuales y contactos con flujos de lava; Zona de Riesgo Moderado Alto (Naranja), encontradas mayoritariamente al norte de la isla y que indican zonas donde es posible que existan desvíos de un futuros flujos de lava; Zona de Riesgo Moderado Bajo (Amarillo), encontrados al NW y SW del cono volcánico y que indican que estas zonas podrían ser afectados eventualmente por los factores anteriormente mencionados; Zona de Riesgo Bajo (Verde), encontradas en su mayoría en la zona SW de la isla y que indican zonas que están protegidas de algún flujo de lava, donde no existen pendientes abruptas y presencia de fisuras actuales.

Cabe destacar que el mapa de riesgo obtenido es netamente exploratorio, ya que se necesitan más antecedentes del lugar para que se puedan describir y visualizar los riesgos de manera más óptima.

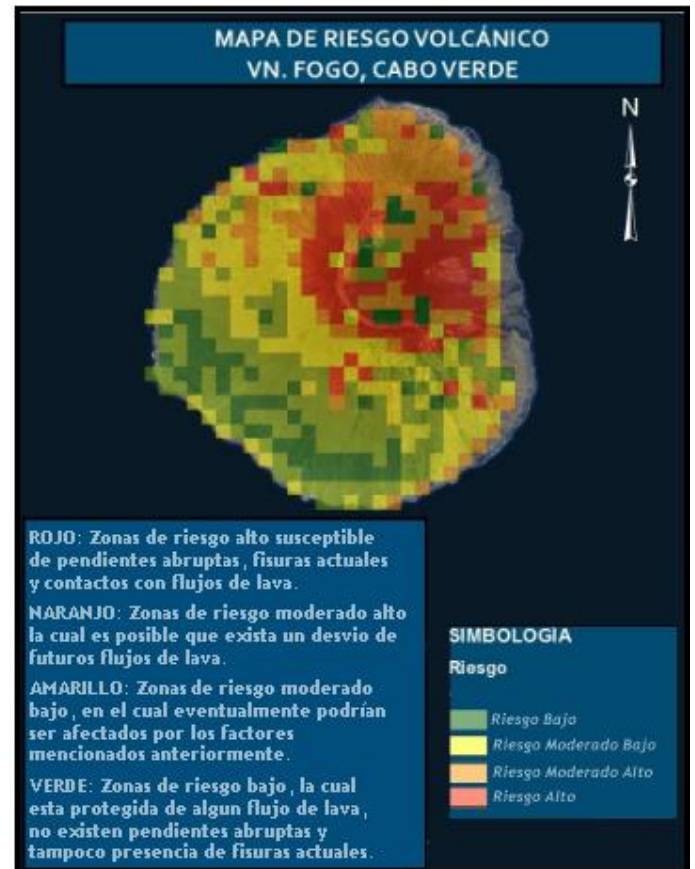


Figura 5. Mapa exploratorio de riesgo volcánico, para el volcán Fogo de Cabo Verde.

5. Análisis y Discusión

5.1 Interferometría

El ruido observado en los mapas generados se debe a que dichas zonas experimentan baja coherencia, lo cual hace que las franjas de interferencia tengan un alto grado de incerteza [17]. Acorde a registros históricos, la zona noreste posee depositación de lavas con superficies altamente rugosas. Los valores de baja coherencia por lo general están asociado a cambios bruscos del relieve o rugosidad [14], lo cual puede ser consistente con depósitos de lavas. A pesar de lo anterior, el área de subsidencia es correctamente observada a diferencia de otros trabajos como el de Remy et al., [21], en la cual no se puede obtener una buena apreciación de los fringes asociados a procesos de deformación cortical.

Los resultados interferométricos del 3 a 27 de noviembre de 2014 (Figura 4.a) muestran una estructura conformada por 2-3 lóbulos apreciables, lo que reconocemos como un patrón mariposa y que es consistente con otros estudios de la zona [11]. La mayor



deformación de esta se debería presentar el interferograma en la **Figura 4d**, debido a que aquí se representa la deformación que transcurrió a lo largo de todo el proceso eruptivo, además de poseer una imagen con bajos niveles de ruido granular (speckle) lo cual permite identificar fringes.

Este patrón mariposa podría estar indicando la presencia de una falla. Sin embargo y considerando que se tiene conocimiento de al menos tres fallas cercanas al cono volcánico, se estima más apropiado hablar de una zona de falla en dicha región, ya que no se sabe con certeza si corresponde a alguna de las fallas ya registradas o a una posible falla incipiente, que podría estar muy relacionada con la última erupción del volcán. Por lo cual, un trabajo in situ junto a un nuevo estudio satelital, serían muy favorables para el análisis de las pasadas y actuales estructuras morfológicas presentes en el volcán, además de que permitirían generar un bosquejo más actualizado de éstas.

5.2 Delimitación Del Riesgo Volcánico

Los poblados Portela y Bangaeira ubicados al Noroeste y Oeste del volcán, son los más cercanos a este macizo volcánico. La permanencia de estos poblados llama profundamente la atención ya que, a pesar de las erupciones pasadas, se siguió poblando los alrededores del volcán. Durante la erupción de 2014 se produjo la destrucción de estas ciudades por parte de coladas de lava proveniente de un cono adventicio en la ladera oeste del volcán donde la ciudad de Portela y Bangaeira fueron destruidas en un 100% y 70% respectivamente, como lo mencionan Gomes en su reporte [10]. Por lo cual, generar un mapa de riesgo, ayuda a la delimitación de zonas seguras que este podría tener en caso de otra erupción y de una posible reconstrucción de viviendas en la zona.

Las zonas verdes que se registran a los alrededores del cono volcánico y adventicio, nos indican coladas de lavas históricas, que al observar detalladamente en la **Figura 3**, muestran que las recientes coladas de lava bordearon las más antiguas, por lo cual esta podría ser una zona más cercana y segura para los pobladores. Cabe mencionar, como se explicó anteriormente, que este es un mapa netamente exploratorio, por lo que, observaciones in situ serían ideales para la generación de un óptimo y eficiente mapa de riesgos.

Se debe mencionar además, que esta isla no presenta zona de seguridad, dado que si consideramos lo establecido por el Instituto Geográfico Nacional para la creación de un mapa de riesgo, se indica una zona segura o libre de riesgo en un radio de 30 km, y la isla tiene un diámetro de 22 km, lo que la ubica completamente en una zona de riesgo.

6. Conclusiones.

Contar con un mapa de riesgos volcánicos es primordial, debido a la cantidad de daños que puede producir un volcán; he aquí la importancia de realizar uno. Esto proporciona a la comunidad conocimiento de los peligros existentes cerca del volcán, ayudando a que se tomen medidas preventivas con respecto a esto, como por ejemplo, considera las zonas de riesgo al momento de construir edificaciones, señalar un área de seguridad, vías de evacuación, etc.

Los métodos y herramientas que se llevaron a cabo en esta investigación, contribuyeron a cumplir el objetivo esperado, como lo fue la creación de interferogramas, donde se pone en manifiesto que existen zonas de deformación cortical asociado a un evento volcánico [21], siendo la más característica el patrón “mariposa”, lo que indica claramente la presencia de una falla. Teniendo en cuenta esta información, además de factores como coladas de lavas históricas, pendiente, relieve y uso de suelo, fue posible delimitar las zonas propensas a riesgo, obteniendo así un mapa exploratorio.

Como se ha mencionado anteriormente, se necesita mayor información del lugar para poder delimitar de mejor manera los riesgos asociados a este volcán, producto de algunos errores que se puedan observar en el mapa exploratorio de riesgos. Además, se debe mencionar que es complicado, en esta instancia, definir si esta falla fue producto de la erupción del año 2014 o es una falla ya registrada, debido a que no se tienen datos ni registros in situ para poder estimar o corroborar esta información. Por lo cual, se propone un análisis satelital más robusto además de un registro detallado del lugar, para poder definir lo que ocurre estructuralmente en este sector y poder delimitar la susceptibilidad que presenta esta isla, ante los riesgos que puede producir este volcán.

7. Agradecimientos.

Los autores agradecen la amabilidad de Rodrigo Santander Massa, por la ayuda entregada al momento de realizar el mapa exploratorio de riesgo volcánico y el intercambio de conocimiento que puede proporcionar la interferometría en el campo de la geofísica.

8. Referencias.

- [1] Brum da Silveira, A., Madeira, J., Serralheiro, A. (1997). A estrutura da Ilha do Fogo, Cabo Verde. A Erupção Vulcânica de 1995 na Ilha do Fogo, Cabo Verde. Publ. IICT, Lisboa: pp.63–78.



- [2] Brum da Silveira, A., & Madeira, J. (2006). Morphology and Structure of Fogo Island (Cape Verde): new data. In VII Congresso Nacional de Geologia (p. 682). Evora: Universidade de Evora.
- [3] Campbell, J., & Wynne, R. (2011). Introduction to remote sensing (1st Ed.). New York [u.a.]: Guilford.
- [4] Carracedo, J., Fra-Paleo, U., Rodríguez Badiola, E., Pérez Torrado, F., Paris, R., & Guillou, H. et al. (2006). Los volcanes del Parque Nacional del Teide (1st ed., p. Cap.12). [Madrid]: Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.
- [5] Devey, C., Lackschewitz, K., Mertz, D., Bourdon, B., Cheminée, J., & Dubois, J. et al. (2003). Giving birth to hotspot volcanoes: Distribution and composition of young seamounts from the seafloor near Tahiti and Pitcairn islands. *Geology*, 31(5), 395. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0395:gbthvd>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0395:gbthvd>2.0.co;2)
- [6] Department of Regional Development (1990). Disaster, Planning and Development: Managing Natural Hazards to Reduce Loss. (1st ed.). Washington, D.C.
- [7] DIVA-GIS, (n.d). Download data by country, Diva-gis.org. <http://www.diva-gis.org/gdata>. Accesado por última vez el 4 de agosto del 2016.
- [8] Elsworth, D. & Day, S. (1999). Flank collapse triggered by intrusion: the Canarian and Cape Verde Archipelagoes. *Journal of Volcanology And Geothermal Research*, 94(1-4), 323-340. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-0273\(99\)00110-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-0273(99)00110-9).
- [9] Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (1st ed., p. A-14). Noordwijk: ESA. ISBN: 92-9092-233-8.
- [10] Gomes, F. (2014). El volcán Fogo se come el pueblo de Portela en Cabo Verde. *El Huffington Post*. http://www.huffingtonpost.es/2014/12/08/flocan-fogo-cabo-verde_n_6287570.html
- [11] González, P., Bagnardi, M., Hooper, A., Larsen, Y., Marinkovic, P., Samsonov, S., & Wright, T. (2015). The 2014-2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9239-9246. <http://dx.doi.org/10.1002/2015gl066003>
- [12] Harris, D. (2012). Mapa de Riesgo de evaluación del Monte Merapi, en Java Central, Indonesia mediante teledetección. *Terremoto-Report*, 1(2). <http://es.earthquake-report.com/2012/01/11/hazard-map-assessment-of-mount-merapi-central-java-indonesia-using-remote-sensing/>
- [13] Instituto Geográfico Nacional (n.d). Peligrosidad y riesgo volcánico. Ign.es. Obtenido de <https://www.ign.es/ign/layoutIn/peligrosidad.do>. Accesado por última vez el 11 de agosto del 2016.
- [14] Kümmerlin, I. (2001). EL RADAR ISAR (Radar de Apertura Sintetica Inversa) (1st ed., p. 4). Obtenido de <http://revistamarina.cl/revistas/2001/4/Kummerlin.pdf>
- [15] Lara, L., & Calderón, R. (2015). Peligro y riesgo específico asociado al volcán Chaitén: perspectiva geológica de la vulnerabilidad en el entorno de un volcán activo. *Magallania (Punta Arenas)*, 43(3), 27-35. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-22442015000300003>
- [16] Massonnet, D., and K. L. Feigl (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36, 441–500, doi: 10.1029/97RG03139.
- [17] Massonnet, D., and F. Sigmundsson (2000), Remote sensing of volcano deformation by radar interferometry from various satellites, in *Remote Sensing of Active Volcanism*, *Geophys. Monogr.* Edited by P. Mouginiis-Mark, J. A. Crisp, and J. H. Fink, pp. 207–221, AGU, Washington, D. C.
- [18] Massonnet, D., & Souyris, J. (2008). *Imaging with synthetic aperture radar* (1st ed., p. 180). Boca Raton, FL: CRC.
- [19] Perez-Torrado, F., Moreno Medina, C., Rodriguez-Gonzalez, A., Carracedo, J., Nesky Rodrigues, A. and Dinis, H. (2015). La erupción de Fogo (Cabo Verde) de 2014-15. *Enseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, [online] 23(1), p.122. <http://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/298966/388240>.
- [20] Ramalho, R., Winckler, G., Madeira, J., Helffrich, G., Hipolito, A., & Quartau, R. et al. (2015). Hazard potential of volcanic flank collapses raised by new megatsunami evidence. *Science Advances*, 1(9), e1500456-e1500456. <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1500456>
- [21] Remy, D., Y. Chen, J. L. Froger, S. Bonvalot, L. Cordoba, and J. Fustos. (2015). Revised interpretation of recent InSAR signals observed at Llaima volcano (Chile). *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3870–3879. doi:10.1002/2015GL063872.



- [22] Rodríguez López, M., Piñeiro Sánchez, C., & de Llano Monelos, P. (2013). Mapa de Riesgos: Identificación y Gestión de Riesgos. *Revista Atlántica De Economía*, 2(1)
- [23] Sellés, Daniel, Rodríguez, A. Carolina, Dungan, Michael A., Naranjo, José A., & Gardeweg, Moyra. (2004). Geochemistry of Nevado de Longaví Volcano (36.2°S): a compositionally atypical arc volcano in the Southern Volcanic Zone of the Andes. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 293-315. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082004000200008>
- [24] Sernageomin. (2016). Mapas de amenaza o riesgo volcánico. Red de vigilancia volcánica | Sernageomin. [Online]. <http://www.sernageomin.cl/volcanes-mapas.php>.
- [25] Veci, L. (2016). SENTINEL-1 Toolbox; SAR Basics Tutorial (1st Ed.). Array Systems Computing Inc. <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>



Water Hammer Analysis using a Hybrid Scheme. Análisis del Golpe de Ariete usando un Esquema Híbrido.

John Twyman Quilodrán¹

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Article history:

Received
17-07-2017
Accepted
18-08-2017
Available
17-10-2017

Keywords:
Hybrid scheme
Implicit finite –
difference method
(IFDM)
Method of
Characteristics
(MOC)
Pipe network
Water hammer.

Historial del artículo:

Recibido
17-07-2017
Aceptado
18-08-2017
Publicado
17-10-2017

Palabras Clave:
Golpe de ariete
Método de
diferencias finitas
implícito (MDFI)
Método de las
Características
(MC)
Esquema híbrido
Red de tuberías.

Abstract

Water hammer is analyzed using an original hybrid scheme that solves the transient flow by applying the Method of Characteristics (MOC) on those pipes with a Courant number equal or approximately equal to 1.0, and the Implicit Finite-Difference Method (IFDM) on the pipes with Courant less than 1.0. The proposed algorithm allows solve the transient flow problem applying the best method (MOC or IFDM) in each system pipe depending on the Courant number assigned to it. By analyzing the transient flow in two pipe networks it is demonstrated that this solution-type allows obtain almost exact and/or conservative solutions without consuming too many resources such as computational memory and software execution time.

Resumen

Se analiza el golpe de ariete utilizando un esquema híbrido original que resuelve el flujo transitorio aplicando el Método de las Características (MC) en aquellas tuberías con un número de Courant igual o aproximadamente igual a 1.0 y el Método de Diferencias Finitas Implícito (MDFI) en las tuberías con Courant inferior a 1.0. El algoritmo propuesto permite resolver el problema del flujo transitorio aplicando el mejor método (MC o MDFI) en cada tubería del sistema, dependiendo del número de Courant que tenga asignado. Al analizar el flujo transiente en dos redes de tuberías se demuestra que este tipo de solución permite obtener soluciones casi exactas y/o conservadoras sin consumir demasiados recursos relacionados con la memoria computacional y el tiempo de ejecución del software.

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



1. Introduction.

In the modern era the transient flow study has occupied the attention of prominent researchers since the late eighteenth century, when Euler made his first contributions on the subject [25]. This process had a renewed impetus in the mid-1960s when Streeter and Lai [18] presented the first studies using computational methods. This was the beginning of a need tide related to the efficient pipe networks modelling, with the objective of assuring design and operation levels that would allow

reduce the costs and ensure the longevity of the systems with a minimum of service interruption. Despite the theoretical development observed internationally in the last decades, the quantity of computer programs and specialized services for the water hammer analysis is not abundant. This may be because of the problem complexity where the research and development (R&D) can take several years. In general, knowledge about the subject can be mainly sought on universities and some international engineering and consulting companies (**Table 1**).

Table 1: Some institutions and companies dedicated to the water hammer study and solution.

| Institution | Software name | Solution method |
|-------------------------------|--------------------------|--|
| Applied Flow Technology | AFT Impulse | Method of Characteristics (MOC) |
| Flow Science Inc. | FLOW 3-D | TruVOF |
| Hydromantis Inc. | ARTS | MOC |
| BHR Group | FLOWMASTER 2 | MOC |
| Bentley Systems, Inc. | HAMMER | MOC |
| Stoner Associates, Inc. | LIQT | MOC |
| DHI | HYPRESS | Finite-Difference Method (4th order) |
| University of Auckland | HYTRAN | MOC |
| University of Cambridge | PIPENET Transient Module | MOC |
| University of Kentucky | SURGE | Wave Method (WM) |
| University of Toronto | TRANSAM | MOC |
| Univ. Politécnica de Valencia | DYAGATS | MOC |
| Univ. Politécnica de Valencia | ARHIETE | MOC |
| WL / Delft Hydraulics | WANDA | MOC |
| US Army Corps Engineers | WHAMO | Implicit Finite-Difference Method (IFDM) |
| DHI | MIKE URBAN | MOC |
| Innovyze | H ₂ O SURGE | WM |
| KYPIPE | SURGE | WM |
| EPA | EPA SURGE | WM |
| Unisont Engineering, Inc. | uSLAM | MOC |

Table 1 highlights the MOC and WM. MOC is characterized by being explicit and because it allows find more detailed results along the pipes [10]. However, in MOC is mandatory to comply with the Courant condition (C_r) to guarantee its results' stability and numerical accuracy, which can cause execution to become slower. The WM (formerly known as Characteristic Wave Method) has proved to be as accurate as the MOC, although faster and computationally more efficient for solving large pipe networks composed by several thousand of nodes and pipes [26, 27]. This is because it solves the state variables (flow rate: Q , piezometric head: H) only in the pipes' boundary nodes, which significantly reduces the calculations quantity to be performed in each simulation time step (Δt). In spite of this, the WM has several disadvantages, mainly highlighting: (1) it cannot performing calculations related to the vapor cavities, with the water demands or with the friction, phenomena that have a distributed form along the pipes [4]; (2) Δt must be sufficient small in order to be able to faithfully represent the functions that model perturbations in pressures, flows and pressure waves. In addition, WM cannot work with excessively short pipes, so the WM developers recommending remove such pipes from the system since they would have little effect on the steady state analysis and would only add unnecessary complications to the transient analysis. There is an aspect that characterizes all the programs shown in **Table 1**: they only apply one numerical solution scheme to solve the transient flow in all network pipes. There are few literature examples where more than one solution algorithm has been applied to solve the transient flow within the same system, being its main orientation to eliminate the short pipes influence in the Δt determination rather than to constitute an alternative to solve the transient in pipes with $C_r < 1.0$. For example, in MOC's context, Wylie and Streeter [28], Karney [6] and Karney y McInnis [8] use a mathematical expression called pipe replacement element (PRE) to dispense with disproportionately short pipes that can generate a too small Δt . Twyman et al. [19] and Vakil y Firoozabadi [23] also use the PRE as a part of the External Energy Dissipator (EED), where the replacement element considers within its formulation, apart from the pipe itself, the boundary element which is connected (reservoir or valve), as a whole. In summary, most of the programs designed to solve the transient flow lack the ability to discriminate against the C_r assigned to each pipe and to apply, in each pipe, the most appropriate numerical scheme accordingly: MOC when the pipe has $C_r = 1.0$ (or $C_r \cong 1.0$), and other more stable and accurate scheme, for example: IFDM, when the pipe has $C_r < 1.0$. The objective of the present work is to show the applicability of a new numerical methodology that tries to approach the transient flow problem through a hybrid or multidirectional-type method [13], which has the original peculiarity of solving each system pipe in each Δt according to the MOC or the IFDM depending on the

C_r present in each pipe. The equations governing transient flow, wave speed, and the complete equations defining MOC and IFDM can be reviewed in Wylie and Streeter [28, 29]; Chaudhry [1-3], and Twyman [20-22]. The theory regarding boundary conditions and their solution through the MOC can be extensively reviewed in Watters [24], Karney [6] and Karney and McInnis [7, 8]. Therefore no further details will be given here.

2. Material and methods

2.1. Solution using a hybrid or multidirectional scheme

An efficient solution for water hammer in pipe networks consists in to discriminate each pipe according to its $C_r = a \cdot \Delta t / \Delta x$ (a = wave speed, Δt = time step and Δx = pipe reach length, with L = pipe length and N = number of reaches), applying the MOC in pipes with $C_r = 1.0$ (or C_r very close to 1.0), and the IFDM in pipes with $C_r < 1.0$, which means applying a hybrid or multidirectional solution scheme [19] -see **Figure 1**, whose stages will be briefly described below.

2.2. Solve the pipe network for steady-state flow.

Before starting the transient analysis it is usual to solve the network for steady-state flow (Q_0, H_0) that will be its initial solution. At this point it is recommended to avoid those algorithms based on nodal approaches (e.g. Method of Cross), since they present some convergence problems in complex networks, being more appropriate use the Gradient Method (GM)-based schemes [11, 15, 16]. Some of the GM advantages are:

- It is extremely convergent.
- It works on open or closed networks (with loops), regardless of their complexity level.
- It converges to the final solution from any initial solution.

The GM is the solution algorithm for EPANET [14] and other programs.

2.3. Network discretization.

Once the pipe network has been solved for the steady-state flow, the transient condition must be calculated, where it is first necessary to discretize the network; that is, to determine the common Δt for all the pipes and the Δx of each pipe section. This is necessary for determine the each pipe's space-time computational grid, for which it is necessary to apply the following general steps before solving using the MOC:

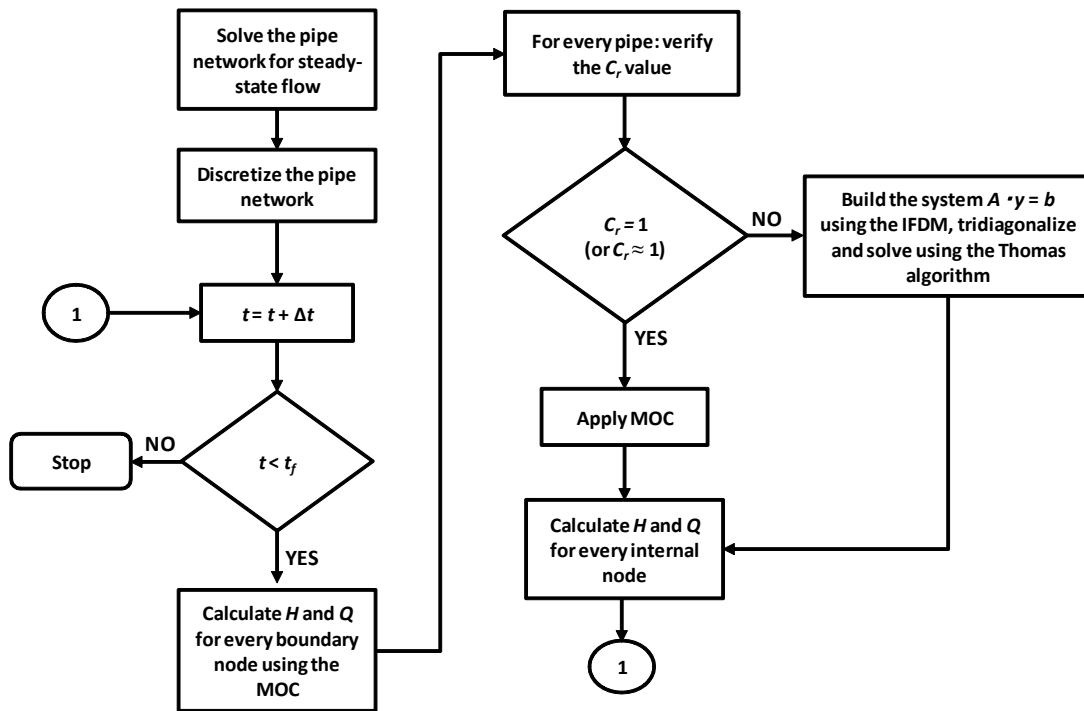


Figure 1: basic hybrid or multidirectional scheme flowchart (t_f = maximum simulation time).

- Choose the system's shortest pipe (control pipe). Assign a value to N_0 , for example, 1, 2 or 3 (N_0 = number of reaches of the shortest pipe).
- Calculate $\Delta x_0 = L_0/N_0$ (L_0 = length of the shortest pipe).
- Calculate the wave speed a_0 for the shortest pipe.
- Once a_0 is calculated, suppose that shortest pipe fulfill with Courant, that is: $C_n = a_0 \cdot (\Delta t/\Delta x_0) = 1.0$.
- Calculate $\Delta t = L_0/(N_0 \cdot a_0)$, which corresponds to the simulation time step.
- Known Δt suppose for the rest of pipes that $C_n = N \cdot a \cdot (\Delta t/L) = 1.0$.
- With each pipe data, calculate $N = \text{int}[L/(a \cdot \Delta t)]$, where the term *int* means positive integer value.
- Once known N , calculate $\Delta x = L/N$.

The procedure shown above allows calculate the simulation time step (Δt), the shortest pipe's reach (Δx_0) and the reach (Δx) for the remaining network's pipes. With this it is possible to define

the space - time grid needed to apply the MOC in each pipe.

2.4. Calculate H and Q for every network node using the MOC.

It is possible to apply a useful approach to model different boundary conditions (or hydraulic devices), which facilitates Q and H calculation [6, 8, 17, 19]:

$$H_p^{t+\Delta t} = C_c - B_c \cdot Q_{ext} \quad (1)$$

Where $H_p^{t+\Delta t}$ = pressure at the pipes point junction; C_c and B_c = known constants and Q_{ext} = external nodal flow, which may be constant, a function of time or some constitutive relation (polytropic equation). The compatibility equation (1) allows easily solve the transient flow in complex networks composed of simple nodes, reservoirs, valves, etc., where it is enough to know the Q_{ext} analytical expression for each of these boundary conditions in order to determine $H_p^{t+\Delta t}$ value at each simulation time step.

2.5. For each pipe: verify C_r value.

This action is verified with C_r values calculated in step 2.3.

2.6. If $C_r < 1.0$. Build system $A \cdot y = b$ using the IFDM and then solve it.

The system of equations is constructed from the dynamics and continuity equations that define the transient flow, and it can be expressed for each discretized pipe as follows in IFDM's terms:

$$d_1 Q_i^{t+\Delta t} + d_2 Q_{i+1}^{t+\Delta t} - d_3 H_i^{t+\Delta t} + d_3 H_{i+1}^{t+\Delta t} + d_4 = 0 \quad (2)$$

$$-c_1 Q_i^{t+\Delta t} + c_1 Q_{i+1}^{t+\Delta t} + c_2 H_i^{t+\Delta t} + c_3 H_{i+1}^{t+\Delta t} + c_4 = 0 \quad (3)$$

In the system $A \cdot y = b$, y is a vector which includes the variables $Q_i^{t+\Delta t}$ and $H_i^{t+\Delta t}$, with $i = 1, 2, \dots, N + 1$, b is a vector which includes the coefficients c_4 and d_4 for each internal node and for the pipe's boundary conditions (upstream and downstream), and A is a matrix which includes the coefficients d_1, d_2, d_3, c_1, c_2 and c_3 . By means of a suitable arrangement, the matrix A can be converted in a three-banded matrix which can be solved quickly and efficiently using Thomas algorithm, also known as double-sweep algorithm [12].

2.7., 2.8. Calculate H and Q for each internal node.

For the pipe which will be solved by MOC, the following system of equations must be solved for each internal node (or section):

$$H_p^{t+\Delta t} = C_p - \frac{a}{gA_p} Q_p^{t+\Delta t} \quad (4)$$

$$H_p^{t+\Delta t} = C_M + \frac{a}{gA_p} Q_p^{t+\Delta t} \quad (5)$$

Where C_p and C_M are known constants, g = acceleration due to gravity and A_p = pipe cross-section. For the pipes solved by the IFDM the solution for each section is known from the solution of the system $A \cdot y = b$, as is shown in step 2.6. The hybrid scheme is exempt from performing interpolations in the pipe sections when $C_r < 1.0$ because it solves each pipe using the MDFI, all of which leads to results with fewer errors (attenuations) in comparison with the traditional MOC.

3. Results: example 1.

The method described above will be applied to solve water hammer in the pipe network shown in **Figure 2**, which also includes numbering of pipes and nodes. The system has nine pipes, seven nodes, three loops, one constant level reservoir ($H_0 = 191$ m) and a fast closure valve ($T_c = 0.8$ s) located at the downstream end of pipe 9. All the network nodes have elevation

0 (m). **Tables 2 and 3** show the system's data (pipes and nodes). The maximum simulation time is 50 (s). The steady-state flow was solved using EPANET software [14]. Note: for clarity, the term pipe is henceforth restricted to conduits that contain at least one characteristic reach. The end of each reach, where head and flow values must be determined, is called a section. At sections internal to a pipe, the discharge can be obtained from (4) or (5). However, at each end of the pipe an auxiliary relation between head and discharge must be specified. Such a head-discharge relation is called a boundary condition. The term node indicates a location where boundary sections meet [8].

In all cases of the example 1 nodes will be solved using the MOC (equation 1), and each pipe section will be solved by applying:

- MOC (exact solution), which means that all pipes have $C_r = 1.0$. This is achieved by adopting $\Delta t = 0.1$ (s) and $N = 6, 8, 5, 6, 4, 5, 7, 5$ and 6 for pipes 1 to 9, respectively.
- Hybrid scheme in some pipes with $C_r < 1.0$. This requires discretizing the network as follows: $\Delta t = 0.08$ (s) and $N = 6, 10, 4, 5, 5, 4, 6, 6$ and 5 for pipes 1 to 9, respectively, being C_r equal to: 0.79, 1.00, 0.64, 0.67, 1.00, 0.64, 0.69, 0.96 and 0.66.

Figure 3 shows the network scheme together with the main equations involved in the transient flow calculation when applying the MOC or the hybrid scheme.

Figure 4 shows the result obtained when the transient flow is solved by MOC with $C_r = 1.0$ in all pipes, and when the hybrid scheme is applied with $C_r < 1.0$ in most pipes. The hybrid scheme solves sections in pipes 1, 3, 4, 6, 7 and 9 using the IFDM. In the remaining pipes (2, 5 and 8) sections are solved via the MOC.

Both the result for MOC and the hybrid scheme are shown in separate curves in order to visualize the curves shape in both cases.

Observing the results of **Figure 4**, it is noticed at first sight that the hybrid scheme shows for node 2 a pressure vs. time curve very similar to that given by the MOC (exact).

Tables 4 and 5 summarize the maximum and minimum pressures (**Figure 4**) obtained by the MOC (exact, $C_r = 1.0$) and by the hybrid scheme ($C_r < 1.0$) at different simulation times.

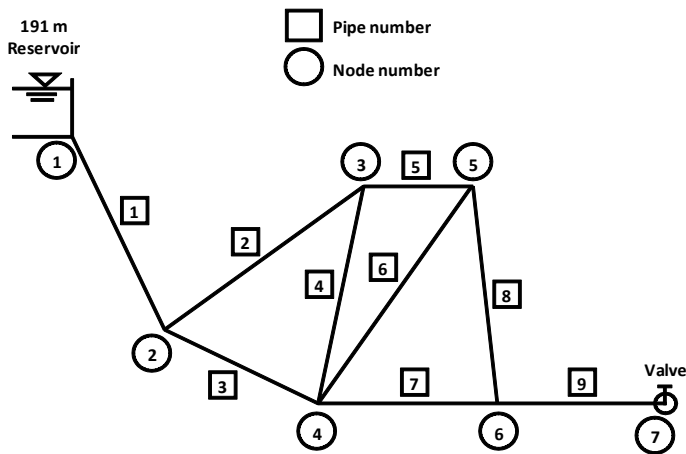


Figure 2. Network scheme (Example 1).

Table 2. Pipes data.

| Pipe number | Diameter D (mm) | Length L (m) | Initial flow Q_0 (L/s) | Darcy friction f | Wave speed a (m/s) |
|-------------|-------------------|----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 914.40 | 609.60 | 849.51 | 0.031 | 1,005.84 |
| 2 | 762.00 | 914.40 | 406.06 | 0.028 | 1,143.00 |
| 3 | 609.60 | 609.60 | 443.44 | 0.024 | 1,219.20 |
| 4 | 457.20 | 548.64 | 179.81 | 0.020 | 914.40 |
| 5 | 457.20 | 457.20 | 226.25 | 0.020 | 1,143.00 |
| 6 | 457.20 | 487.68 | 114.68 | 0.025 | 975.40 |
| 7 | 762.00 | 670.56 | 508.57 | 0.041 | 957.10 |
| 8 | 609.60 | 457.20 | 340.93 | 0.030 | 914.40 |
| 9 | 914.40 | 609.60 | 849.51 | 0.025 | 1,005.80 |

Table 3. Network nodes data. A simple node is one that joins only pipes.

| Node number | Device (or node) description | H_0 (m) |
|-------------|------------------------------|-----------|
| 1 | Constant head reservoir | 191.00 |
| 2 | Simple node | 189.28 |
| 3 | Simple node | 187.90 |
| 4 | Simple node | 186.48 |
| 5 | Simple node | 185.85 |
| 6 | Simple node | 184.25 |
| 7 | Control valve | 182.88 |

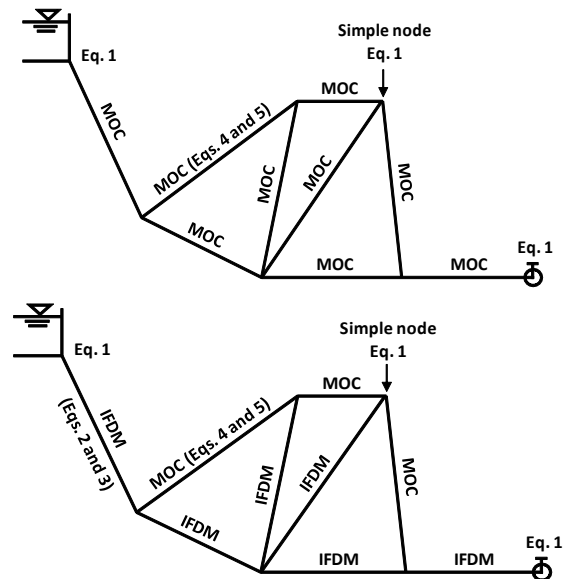


Figure 3. Network scheme with the solution methods in each pipe and equations involved (Up: MOC, bottom: hybrid scheme).

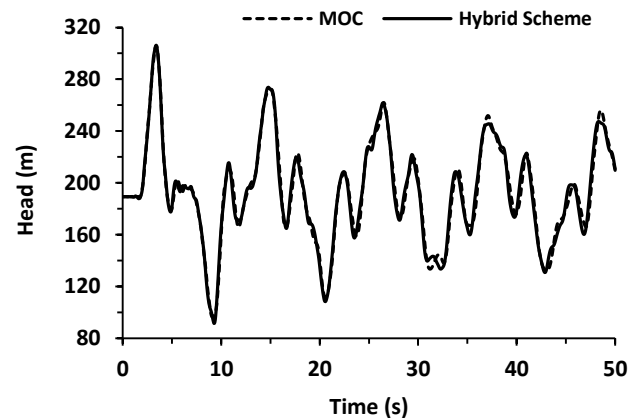


Figure 4. Head vs. time plot at node 2 according to the MOC with Courant equal to 1.0 in all pipes (exact result), and according to the hybrid scheme with Courant less than 1.0 in most pipes.

Table 4. Comparison of maximum heads between MOC and hybrid scheme.

| Maximum head number | MOC ($C_r = 1.0$) | Time (s) | Hybrid scheme ($C_r < 1.0$) | Time (s) |
|---------------------|---------------------|----------|-------------------------------|----------|
| 1 | 306.17 | 3.4 | 305.54 | 3.4 |
| 2 | 271.75 | 15.1 | 273.81 | 14.8 |
| 3 | 261.94 | 26.5 | 261.70 | 26.4 |
| 4 | 251.82 | 37.1 | 245.64 | 37.2 |
| 5 | 255.68 | 48.5 | 247.38 | 48.3 |

Table 5. Comparison of minimum heads between MOC and hybrid scheme.

| Minimum head number | MOC ($C_r = 1.0$) | Time (s) | Hybrid scheme ($C_r < 1.0$) | Time (s) |
|---------------------|---------------------|----------|-------------------------------|----------|
| 1 | 96.32 | 9.1 | 91.5 | 9.3 |
| 2 | 111.67 | 20.6 | 108.33 | 20.6 |
| 3 | 172.49 | 28.2 | 171.24 | 28.1 |
| 4 | 132.86 | 43.1 | 130.80 | 42.9 |

4. Results: example 2.

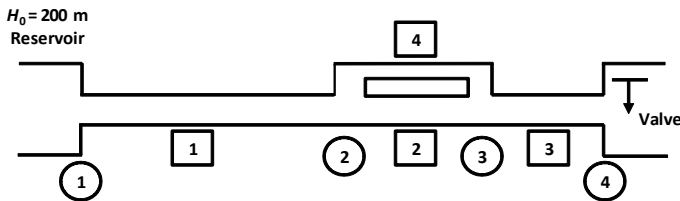


Figure 5. Network scheme (Example 2). Adapted from Karney and McInnis (1990).

In this case, the system (**Figure 5**) is composed of one constant level reservoir ($H_0 = 200$ m) located upstream of the system, three series pipes plus a fourth parallel to pipe 2, and a quick-closing valve ($T_c = 1$ s) located at the downstream end of pipe 3 [7]. All the network nodes have elevation 0 (m). The maximum simulation time is 60 (s). **Tables 6 and 7** show the data for pipes and network nodes, respectively. As in the previous example, the transient flow in the network internal nodes will be solved according to the following methods:

- MOC (all pipes with $C_r = 1.0$). This is achieved by discretizing the network as follows: $\Delta t = 0.1$ (s) and $N = 20, 10, 10$ and 10 for pipes 1 to 4, respectively.
- Hybrid scheme with some pipes with $C_r < 1.0$. This is achieved by adopting the following: $\Delta t = 0.07$ (s) and $N = 28, 10, 10$ and 14 for pipes 1 to 4, respectively, being C_r equal to: 0.98, 0.70, 0.70 and 0.98.

As in the previous example, boundary nodes will be solved via MOC applying equation 1 (reservoir, node, valve), and in this case the hybrid scheme will solve all the pipes with $C_r \geq 0.98$ applying MOC. **Figure 6** shows a network scheme together with the main equations involved in the transient flow calculation according to MOC and hybrid scheme. The result is shown in **Figure 7**, which corresponds to the head vs. time plot for node 4, where it is verified that the hybrid scheme presents a solution similar to that obtained by MOC (exact). **Tables 8 and 9** summarize the maximum and minimum pressures (**Figure 5**) obtained between MOC (exact, $C_r = 1.0$) and the hybrid scheme ($C_r < 1.0$) at different simulation times.

Table 6. Pipes data.

| Pipe number | Diameter D (mm) | Length L (m) | Initial flow Q_0 (L/s) | Darcy friction f | Wave speed a (m/s) |
|-------------|-------------------|----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 1.00 | 2,000 | 0.933 | 0.026 | 1,000 |
| 2 | 1.00 | 1,000 | 0.789 | 0.026 | 1,000 |
| 3 | 1.00 | 1,000 | 0.993 | 0.026 | 1,000 |
| 4 | 0.60 | 1,000 | 0.204 | 0.030 | 1,000 |

Table 7. Network nodes data.

| Node number | Device (or node) description | H_0 (m) |
|-------------|------------------------------|-----------|
| 1 | Constant head reservoir | 200.0 |
| 2 | Simple node | 195.8 |
| 3 | Simple node | 194.5 |
| 4 | Valve | 192.4 |

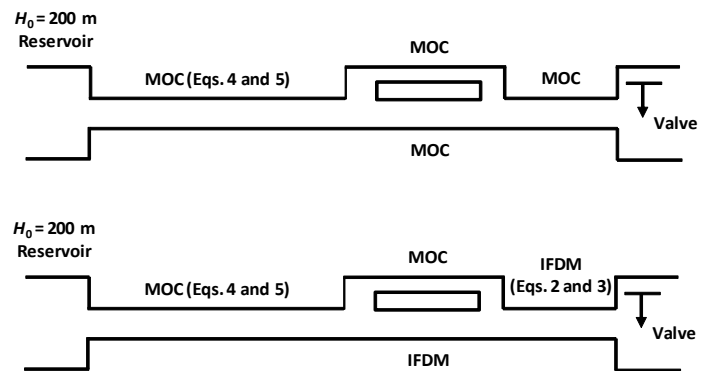


Figure 6. Scheme of the network with the solution methods in each pipe and equations involved (Top: MOC, bottom: hybrid scheme).

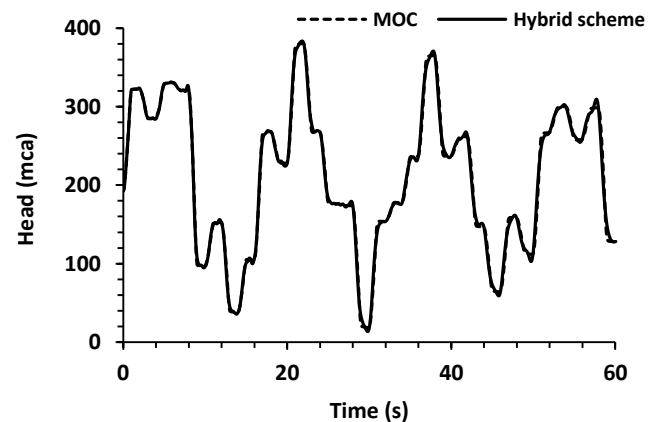


Figure 7. Head vs. time plot at node 4 according to MOC with Courant equal to 1.0 (in all pipes) and the hybrid method with Courant less than 1.0 (in pipes 2 and 3) and Courant approximately equal to 1.0 (in pipes 1 and 4).

Tables 8 and 9 show a comparison between the maximum and minimum pressures obtained between MOC (exact, $C_r = 1.0$) and the hybrid scheme ($C_r < 1.0$) at different simulation times.

Table 8. Comparison of maximum heads between MOC and hybrid scheme.

| Maximum head number | MOC ($C_r = 1.0$) | Time (s) | Hybrid scheme ($C_r < 1.0$) | Time (s) |
|---------------------|---------------------|----------|-------------------------------|----------|
| 1 | 330.98 | 6.0 | 331.56 | 5.8 |
| 2 | 380.97 | 21.9 | 383.64 | 21.8 |
| 3 | 365.57 | 37.9 | 370.92 | 37.8 |
| 4 | 300.14 | 53.8 | 302.66 | 53.8 |

Table 9. Comparison of minimum heads between MOC and hybrid scheme.

| Minimum head number | MOC ($C_r = 1.0$) | Time (s) | Hybrid scheme ($C_r < 1.0$) | Time (s) |
|---------------------|---------------------|----------|-------------------------------|----------|
| 1 | 37.38 | 13.9 | 35.69 | 13.8 |
| 2 | 18.11 | 29.9 | 13.55 | 29.8 |
| 3 | 63.74 | 45.9 | 59.06 | 45.8 |

5. Discussion.

When analyzing the maximum pressures of Example 1 (**Table 4**), it is verified that the maximum error between the hybrid scheme and the MOC is less than +4%. In the case of the minimum pressures (**Table 5**), this error is less than +5%. In comparison to MOC, the application of the hybrid scheme means a little significant computational resources expenditure. For example, in the case analyzed (example 1), the MOC discretized the network with $N_{total} = 52$, with the program execution time being 2.4 (s). In contrast, the hybrid scheme required $N_{total} = 51$, with a system of equations of maximum size equal to 22x22 corresponding to the pipe 2. In addition, it took only 7.9 (s) to solve the problem considering a maximum simulation time of 50 (s). In case of having applied the IFDM as unique solution algorithm, the size of the system of equations would have been at least equal to 112x112, with a significant and expected increase in the use of computational resources. In analyzing the maximum pressures of Example 2 (**Table 8**), it is observed that the error between the hybrid scheme and the MOC is less than +2%. In the case of the minimum pressures (**Table 9**), the hybrid scheme is more conservative, with differences varying between -5% and -25% in the minimum pressure numbers 2 and 3, respectively. The application of the hybrid scheme also does not represent a significant computational resources expense, in this case MOC needed to discretize the network with $N_{total} = 50$, with a program execution time equal to 2.6 (s).

In contrast, the hybrid scheme required $N_{total} = 62$, being the maximum size of the system of equations to be solved, at each time step, equal to 58x58, corresponding to pipe 1. In addition, it took only 8.7 (s) to solve the problem. In case of having applied the IFDM as a unique solution algorithm, the size of the system of equations would have been at least equal to 128x128, with an expected increase in the use of computational resources. Examples 1 and 2 were carried out on a standard PC @ 1.66 (GHz). The option of applying the IFDM or the MOC in the pipe sections depending on whether the C_r of the pipe is lower or greater than a control value CV (for example, 0.98, as adopted in example 2), allows a more efficient modeling, because it is meaningless in numerical terms to apply the IFDM in a section with a C_r very close to 1.0, e.g. $C_r = 0.98$, where MOC application is more practical without compromising the accuracy level neither the solution stability in significant way. Another interesting aspect of hybrid scheme is that it can change its nature depending on the value that CV takes. For example, when CV = 0 (zero), then the hybrid scheme solves all pipes using MOC. This option is useful to apply when the network has only pipes with $C_r = 1.0$. When CV varies between 0 and 1, not including extreme values, the hybrid scheme described in this article applies. When CV = 1, then the IFDM is applied as the only solution scheme. This solution is valid when all pipes have $C_r < 1.0$ (this case is more theoretical than practical because the pre-specified time interval discretization scheme always assigns $C_r = 1.0$ to the system shortest pipe). In both analyzed examples the hybrid scheme meets the condition proposed by Kepler [9] and Wylie [30], who indicating that only when $\psi^* = \Delta t \cdot f \cdot V_0 / 2D \leq 0.02$ is possible to ensure that any method delivers accurate results. Evaluating the equation ψ^* in the examples 1 and 2 is verified for hybrid scheme, and its value oscillates between $1.3 \cdot 10^{-3}$ and $2.4 \cdot 10^{-3}$. In the example 2, the range for ψ^* oscillates between $9.1 \cdot 10^{-4}$ and $1.3 \cdot 10^{-3}$. A hybrid scheme disadvantage is that it must work with a $N = 3$ as a minimum in those pipes where the IFDM is applied, because the pipe discretization must have two pipe reaches at least (one upstream and the other downstream) in order to apply the equations corresponding to boundary nodes, plus an additional pipe reach where to apply the IFDM's dynamics and continuity equations. However, this imposition is offset by the fact that the IFDM, unlike MOC, requires a smaller increase in the total N amount in order to comply with C_r in all system pipes, which could strongly influence the Δt magnitude. Another IFDM's disadvantage is that it can report some numerical instability (spurious oscillations) when it is applied in pipes with $C_r < 0.5$, situation that can be easily corrected by slightly increasing N size (or what is the same, decreasing the Δx size) in affected pipes.



6. Conclusions.

It is a fact that pipe networks are generally composed of pipes with various physical characteristics, and it is also a fact that some water hammer solution schemes, such as the MOC, before their execution, must resort to certain shortcuts, such as alteration of pipe lengths (L) or wave speed (a) adjustment in order to redraw the network discretization and thus to be able to fulfill the Courant condition, thus assuring the results' stability and numerical accuracy. These shortcuts, despite their wide acceptance (and application) in the water hammer theoretical and practical areas, have the disadvantage that they can alter the initial conditions together with the physics of the problem [5], with the risk of leading to results that can be physically incompatible, fictitious or without practical application [21]. Another way is to keep unchanged a and/or L values, and fine-tune both the discretization and the pipe reach length $\Delta x = L / N$, which may increase N size. Nevertheless, it is clear that the application of these measures becomes obsolete when the design engineer seeks to solve the problem without altering any initial condition, and most importantly, without significantly increasing total N size. Both conditions constitute a new demand level for available waterhammer programs, especially those MOC-based. In this sense, the hybrid scheme is a good alternative solution since it avoids applying a single solution algorithm in networks where there are many pipes with $C_r < 1.0$, maintaining good numerical performance (processing speed, accuracy and numerical stability) without the need for modify any initial system parameter. The hybrid scheme shown in this article, based on a network decoupling, opens the way to implement other solution methods different than IFDM for the pipe sections with $C_r < 1.0$, such as McCormack Method, which is 100% explicit and more stable than MOC.

7. References

- [1] Chaudhry M.H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*, p. 266, New York: Van Nostrand Reinhold. *p. 27-73, 302-331
- [2] Chaudhry M.H. (1982). Numerical Solution of Transient-Flow Equations. Proc. Speciality Conf. Hydraulics Division, ASCE, Jackson, MS, 633-656.
- [3] Chaudhry M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*, p. 583, New York: Springer-Verlag.
- [4] Ebacher G., Besner M.-C., Lavoie J., Jung B.S., Karney B.W., Prévost M. (2011). Transient Modeling of a Full-Scale Distribution System: Comparison with Field Data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(2): 173-182. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000109
- [5] Ghidaoui M.S., Karney B.W. (1994). Equivalent Differential Equations in Fixed-Grid Characteristics Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(10): 1159-1175.
- [6] 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>
- [7] Karney B.W., McInnis D. (1990). Transient Analysis of Water Distribution Systems. *Journal of AWWA*, 62-70.
- [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] Kepler, A.K. (2007). *Leak Detection and Calibration of Transient Hydraulic System Models*. Thesis (Doctoral). São Carlos: University of São Paulo.
- [10] Nascimento T.A. (2015). *Análisis de los Métodos de Cálculo del Golpe de Ariete en las Tuberías*. Trabajo de Graduación en Ingeniería Mecánica. Guaratinguetá: Universidad Estatal Paulista.
- [11] Pilati S., Todini E. (1984). *La Verifica delle Reti Idrauliche in Pressione*. Instituto di Costruzione Idraulica, Facolta D'Ingegneria dell'Universita di Bologna.
- [12] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. (1986). *Numerical Recipes, the Art of Scientific Computing*, p. 933, New York: Cambridge University Press. *p. 43
- [13] Radulj D. (2010). *Assessing the Hydraulic Transient Performance of Water and Wastewater Systems using Field and Numerical Modeling Data*. Toronto: U. of Toronto.
- [14] Rossman L.A. (2000). *EPANET 2 User's Manual*, p. 200, Cincinnati: US Environmental Protection Agency (EPA).
- [15] Salgado R.O., Todini E., O'Connell P.E. (1987, 8-10 September). Comparison of the Gradient Method with some Traditional Methods for the Analysis of Water Supply Distribution Networks. *Proceedings of the International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic (UK).
- [16] Salgado R.O. (1988). *Computer Modelling of Water Supply Networks Using the Gradient Method*. Ph.D. Thesis. Newcastle upon Tyne: University of Newcastle upon Tyne.
- [17] Salgado R., Zenteno J., Twyman C., Twyman J. (1993, 7-9 September). A Hybrid Characteristics-Finite Difference Method for Unsteady flow in Pipe Networks, *International Conference on Integrated Computer Applications for Water Supply and Distribution* (139-150). Leicester.



- [18] Streeter V.L., Lai C. (1963). Waterhammer Analysis Including Fluid Friction. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 128: 1491–1524.
- [19] Twyman J., Twyman C., Salgado R.O. (1997, 22-24 octubre). Optimización del Método de las Características para el Análisis del Golpe de Ariete en Redes de Tuberías. XIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica (53-62). Santiago de Chile: SOCHID.
- [20] Twyman J. (2016a, 26-30 Septiembre). Golpe de Ariete en una Red de Distribución de Agua. Anales del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (pp. 10). Lima: IAHR (Spain Water and IWHR China).
- [21] Twyman J. (2016b). Wave Speed Calculation for Water Hammer Analysis. *Obras y Proyectos*, 20: 86–92. ISSN: 0718–2813. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200007>
- [22] Twyman J. (2017). Water Hammer Analysis in a Water Distribution System. *Ingeniería del Agua*, 21(2): 87–102. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6389>
- [23] Vakil A., Firoozabadi B. (2006). Effect of Unsteady Friction Models and Friction–Loss Integration on Transient Pipe Flow, *Scientia Iranica*, Sharif University of Technology, 13(3): 245–254.
- [24] Watters G.Z. (1984). *Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines*, p. 349, Boston: Butterworth–Heinemann.
- [25] Wood F.M. (1970). History of Water–Hammer. *CE Research Report No. 65*, Queen’s University at Kingston, Ontario, Canada.
- [26] Wood D.J. 2005. Water Hammer Analysis–Essential and Easy (And Efficient). *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 131(8): 1123–1131.
- [27] Wood D.J., Lingireddy S., Boulos P.F., Karney B.W., McPherson D.L. (2005). Numerical Methods for Modeling Transient Flow in Distribution Systems. *Journal of AWWA*, 97(7): 104–115.
- [28] Wylie E.B., Streeter V.L. (1978). *Fluid Transients*, p. 206. McGraw–Hill International Book Company. *p. 17-65, 86-101, 180-189.
- [29] Wylie E.B., Streeter V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*, p. 463. Pearson.
- [30] Wylie E.B. (1996, 16-18 April). Unsteady Internal Flows – Dimensionless Numbers & Time Constants. Proceedings of the VII International Conference on Pressure Surges and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels (283-288). Harrogate: Pressure Surges Publications.

Estudio de la variación del módulo dinámico y la fatiga en mezclas asfálticas densas hechas con diferentes tipos de asfalto y agregado

Study of variation of the dynamic modulus and fatigue life in dense asphalt mixtures made with different types of asphalt and aggregate.

Rey Adame¹, Jorge Alarcón¹, Pedro Limón¹, Israel Sandoval¹, Ignacio Cremades¹

¹Lasfalto S. de R. L. Grupo Surfax, Zapopan, Jalisco, México.
omar.adame@lasfalto.com.mx, telefono +52 33 3684 7304 ext 134

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
24-04-2017
Aceptado
18-08-2017
Publicado
17-10-2017

Palabras Clave:
Módulo Dinámico
Vida a fatiga
Deformación
Creep repetido

Article history:

Received
24-04-2017
Accepted
18-08-2017
Available
17-10-2017

Keywords:
Dynamic modulus
Fatigue life
Rutting
Creep recovery

Resumen

En los últimos años en México se implementó una metodología de diseño de mezclas asfálticas densas de alto desempeño, con el objetivo de mejorar las técnicas de pavimentación, reducir los costos de operación y mantenimiento de los pavimentos flexibles, alcanzar los resultados obtenidos en países desarrollados y principalmente contar con una metodología que se asocie a las condiciones imperantes en la República Mexicana. El "protocolo AMAAC" basado en las teorías empírico-mecanicistas cuenta con un parámetro definido como módulo dinámico y fatiga, datos importantes en el diseño de estructuras de pavimentos flexibles y control de calidad. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos ha sido un parámetro difícil de obtener ya que hasta el momento no son suficientes los laboratorios que cuentan con la infraestructura para poder calcular dichos valores. Es por eso que en este trabajo se analizaron valores de módulo de dos tipos de agregados pétreos representativos para el país, como son el basalto y la andesita y así obtener valores de estos. Además, se analizó el efecto de la utilización de asfaltos modificados, asfaltos endurecidos y un asfalto convencional. Los resultados obtenidos hasta este punto demuestran la importancia del uso de asfaltos modificados para poder obtener mezclas de alto módulo. Además, se demuestra la importancia de evaluar los asfaltos mediante la clasificación "Jnr" y así poder definir la capacidad de un asfalto a desempeñarse bajo diferentes niveles de tráfico. Por otra parte, los valores obtenidos fueron introducidos en un método de diseño de estructuras de pavimento comúnmente usado por los ingenieros dedicados al diseño de estructuras de pavimento en México, como es el desarrollado por la UNAM (Universidad Autónoma de México), DISPAV-5, en el cual se analizaron los valores de módulo para estructuras de pavimento capaces de soportar intensidades de tráfico baja, mediana y alta. Además de determinar el costo-beneficio de las diferentes mezclas. Obteniendo resultados que demuestran la importancia de contar con agregados pétreos y asfaltos de buena calidad debido a que impactan directamente en la calidad de un pavimento así como en los costos y vida a fatiga. Finalmente, el uso de asfaltos modificados solo incrementa el costo inicial en uno por ciento lo que está más que claro que el uso de asfaltos modificados no solo aumenta la vida a fatiga sino que ahorra los costos de mantenimiento y reparación en la estructura.

Abstract

In recent years in México was implemented a design methodology for High performance asphalt mixtures in order to improve pavement techniques, reduce operating costs and maintenance flexible pavements, achieve results in developed countries and mainly have a methodology which is associated to Mexican conditions, the protocolo AMAAC (designed by Mexican Asphalt Association) based mechanistic-empirical theory have the dynamic

modulus and fatigue life. Important data in flexible pavements design and quality control. However, despite the efforts it has been a difficult parameter to get and the moment the laboratories that have the infrastructure to calculate these values are not enough. In this research was analyzed dynamic modulus values of two representative materials for the country: andesite and basalt, and obtain values of these. Furthermore, the effect of the use of modified asphalts is analyzed, hard asphalt and conventional asphalt. The results obtained up to this point demonstrates the importance of using modified asphalt in order to obtain mixtures of high modulus values. In addition, the importance of assessing asphalts is demonstrated by the "Jnr" rating and thus to define the ability of asphalt perform under different traffic levels. Moreover, the values obtained were introduced into a method of designing pavement structures commonly used by engineers dedicated to designing pavement structures such as developed by the UNAM (Autonomous University of Mexico), DISPAV-5. In this software was analyzed the modulus values for pavement structures capable of withstanding low, medium and high traffic intensities. In addition to determining the cost-effectiveness of the different mixtures, obtaining the results that demonstrate the importance of having aggregates asphalts of good quality because they impact directly on the quality of a pavement and as well as costs and fatigue life. Finally, the use of modified asphalt only increases the initial cost by one percent, which makes it clear that the use of modified asphalts not only increases the fatigue life but also saves maintenance and repair costs on the structure.

1. Introducción

México actualmente presenta un sistema carretero en desarrollo y con una gran ambición por parte del gobierno federal de contar con gran cobertura, a la par de estas premisas también toma una gran importancia la implementación de nuevas técnicas y procedimientos que mejoren la competitividad, eficiencia de la calidad de la economía e infraestructura referente a las carreteras. Es por esto que los pavimentos y en especial el diseño de estructuras de pavimento flexible deben tomar la importancia necesaria, así como el correcto uso de las herramientas y equipos destinados para este fin.

En los últimos años las técnicas de pavimentación han experimentado nuevos desarrollos en el uso de maquinaria más sofisticada, así como de productos que modifican el desempeño y las dimensiones de una estructura de un pavimento. Aunado a esto, las condiciones en las que se desempeñan los pavimentos cada día cuentan con condiciones que impactan directamente en el desempeño y en el estado físico del mismo.

Así, durante mucho tiempo en México se usaron los métodos de diseño de pavimentos desarrollados por la AASHTO, por la Universidad Autónoma de México (UNAM) y el del catálogo técnico de secciones de España, siendo el de la UNAM el único método para las condiciones imperantes en la República Mexicana. Sin embargo, es importante analizar secciones de pavimentos con los materiales que comúnmente se usan en México, principalmente con la capa de rodadura siendo esta la que brinda el servicio final al usuario y así tener una idea clara de cómo impacta en los costos, en su desempeño y principalmente en el diseño de estructuras de pavimento flexible.

En este trabajo se presentan varios análisis de estructuras de pavimento diseñadas para condiciones de tráfico con intensidades bajas, medianas y altas, es decir estructuras que van desde secciones con capas de rodadura delgadas hasta secciones con capas de rodadura robustas, y con materiales asfálticos y agregados pétreos de diferentes calidades, analizando su costo final, su impacto en el desempeño y vida, a deformación y fatiga con el uso de materiales asfálticos de diferentes características.

2. Metodología

En este trabajo se hace el uso de varias metodologías para un análisis más completo del costo beneficio sobre el uso de asfaltos modificados y agregados de buena calidad. Inicialmente para el asfalto se usó la clasificación jnr MSCR (Multi-Stress Creep Recovery o creep repetido multi esfuerzo), y grado de desempeño PG, con el objeto de analizar los diferentes asfaltos bajo las metodologías de mayor uso en el mundo y las que ofrecen un análisis más completo para los tipos de asfaltos usados en Latinoamérica y México. Respecto al agregado y diseño de la mezcla se utilizó el protocolo AMAAC (metodología mexicana) con el propósito de observar, analizar el diseño volumétrico y propiedades de desempeño que pueda llegar a obtener la mezcla asfáltica con el uso de este método. Por otra parte se analizaron los valores obtenidos de módulo dinámico y pruebas de fatiga, parámetros relacionados con los conceptos empírico-mecanicistas y que forman parte del protocolo AMAAC en el nivel III y IV, niveles para más de 30 millones de ejes equivalentes. Después de analizar los valores se definió una correlación no numérica entre los valores de módulo, los parámetros de jnr y calidad de los materiales usados en la mezcla. Además se analizó el desempeño de dichos valores de módulo en el DISPAV-5, software más utilizado por la ingeniería mexicana en el diseño de

espesores de pavimento. El programa utiliza la información de tránsito del proyecto y las características de los materiales de cada una de las capas que conforman la estructura. Una vez concluida la entrada de información, el programa calcula los espesores requeridos para evitar la falla por deformación de las capas no estabilizadas con asfalto y por fatiga de las capas asfálticas. Adicionalmente, permite revisar el desempeño por fatiga y deformación de secciones estructurales de pavimentos flexibles a partir de información de tránsito, geometría y características de materiales. El método comprende los dos modelos mecanicistas establecidos en el informe 325: deformación permanente y fatiga. En lo que se refiere a fatiga de las capas asfálticas se considera la investigación internacional así como la realizada en el Instituto, de 1985 a la fecha, en la cual se basan las ecuaciones de fatiga. Para el cálculo de fatiga, los esfuerzos y deformaciones unitarias se estiman con el programa CHEV5, que es una modificación del II del programa CHEV4, desarrollado por la compañía petrolera CHEVRON. El CHEV4 fue proporcionado al II en 1977 por el NITRR de Sudáfrica. Finalmente se hizo un análisis económico en el que solamente se incluyeron costos de los materiales y se definió el beneficio de los usos de asfalto modificado así como su impacto positivo en el desempeño de la mezcla y estructura del pavimento.

3. Resultados y discusiones

3.1 Caracterización del asfalto

Se utilizaron tres diferentes asfaltos que se clasifican con grados PG 64 y 76 según la clasificación SUPERPAVE:

1. Ekbé (asfalto virgen) procedente de la Refinería de Salamanca Guanajuato (PG 64).
2. Ekbé Salamanca endurecido con ácido Polifosfórico (APP=ácido polifosfórico) (PG- 76).
3. Ekbé Salamanca + Polímero RET y ácido polifosfórico como catalizador (PG-76).

El asfalto ekbé Salamanca (asfalto convencional) analizado con el objeto de contar con un asfalto base sin modificar, es decir un asfalto con las características originales procedente de la refinería de Salamanca siendo esta de las más representativas para México. En el caso del asfalto endurecido se empleó en este proyecto para comparar un asfalto que es modificado con ácido polifosfórico usualmente para lograr un grado de desempeño PG superior, sin embargo, es un asfalto que difícilmente cumple con las especificaciones para Jnr como es un tránsito alto y extremo, además que en México la probabilidad de vender un asfalto endurecido es alta y se refleja en resultados desfavorables en los pavimentos. Por último el asfalto modificado con polímero RET se

utilizó para compararlo con los demás asfaltos y garantizar un mejor desempeño en todos los parámetros a utilizar en este trabajo, como son: grado de desempeño y Jnr.

Para esto se realizó un análisis empírico además de su determinación de grado PG a todas las muestras, las cuales se incluyen en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Análisis empírico a los diferentes asfaltos y la determinación del grado de desempeño

| Prueba | Ekbé | Ekbé + APP | Ekbé + APP+ polímero RET |
|---|---------------|------------|--------------------------|
| Penetración a 25° C (1/10 mm) | 51 | 45 | 43 |
| Penetración a 4° C (1/100 mm) | 28 | 25 | 26 |
| Reblandecimiento (°C) | 50 | 58 | 63 |
| Rec. Elástica por Torsión 25° C (%) | 6 | 12 | 53 |
| Resiliencia a 25° C (%) | 2 | 20 | 22 |
| Viscosidad Rotacional 135° C (cP) | 462 | 903 | 1900 |
| Pérdida de masa por calentamiento (%) | 1,67 | 1,57 | 1,45 |
| Penetración a 25° C (1/10 mm) | 15 | 15 | 20 |
| Penetración a 4° C (1/100 mm) | 20 | 14 | 10 |
| Rec. Elástica por ductilómetro 25° C (%) | 4 | 8 | 63 |
| Viscosidad Rotacional 135° C (cP) | 962 | 2288 | 5171 |
| Punto de Inflamación Cleveland °C | >260 | 297 | 384 |
| Viscosidad rotacional a 135° C SC4-27 12 rpm (cP) | 462 | 903 | 1900 |
| Análisis al asfalto original | | | |
| Módulo Reológico de corte dinámico a 76°C [G*/sen δ] (KPa) | 1,513 (64° C) | 1,302 | 1619 |
| Ángulo de fase (δ) a 76 °C (°) | 84,23 (64° C) | 78,50 | 63,76 |
| Análisis del residuo de la película de la prueba de envejecimiento a presión PAV ASTM D 6521 | | | |
| Módulo reológico de corte dinámico a 34° C [G*sen δ] (KPa) | 3625 (28°C) | 1958 | 1691 |
| Rigidez en Creep a -6°C, 60s S (t), (MPa) | 96,195 | 95,81 | 140651 |
| Valor m(t) a -6°C, 60s, | 0,335 | 0,330 | 0,307 |
| Grado | PG 64-16 | PG 76-16 | PG 76-16 |

Los resultados del análisis empírico demuestran las diferencias existentes entre los diferentes asfaltos analizados, principalmente en las recuperaciones elásticas por torsión y ductilómetro. El asfalto modificado con polímero RET presenta una recuperación elástica alta a diferencia del asfalto convencional y asfalto endurecido que presentan recuperaciones elásticas bajas. Sin embargo, en pruebas como el punto de reblandecimiento presentan valores relativamente cercanos. Otra diferencia notable se presenta en la viscosidad rotacional, los valores más altos representan una mayor resistencia al flujo, siendo este un factor importante en la resistencia ante el fenómeno de deformación permanente. Se determinó el grado de desempeño empleando el método SHRP-SUPERPAVE de acuerdo a la metodología AASHTO TP-5. La caracterización por grado PG demuestra las diferencias que pueden llegar a existir entre asfaltos modificados con distintos polímeros, aun entre un mismo grado de desempeño, además una de las diferencias más importantes es el ángulo de fase. El asfalto modificado con polímero RET presenta el ángulo de fase más bajo, es decir, presenta un comportamiento más elástico que los demás asfaltos, mayor resistencia a la deformación y mayor capacidad de recuperar las deformaciones. De igual forma el asfalto modificado con el polímero presenta la viscosidad más alta y representa por lo tanto mayor resistencia al flujo. Posteriormente se realizó la prueba bajo la especificación para Jnr para dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) así como su deformación máxima acumulada, determinando su valor de Jnr y por lo tanto el nivel de tráfico que será capaz de resistir la mezcla.

Los resultados de Jnr tienen una correlación directa con la deformación acumulada, por lo que a valores mínimos de Jnr menor es la deformación acumulada [8]. El asfalto modificado con Polímero RET resulta con los valores más bajos de Jnr y al incrementar el esfuerzo de 100 a 3200 no hay un efecto negativo en este parámetro, es decir, este asfalto tiene una gran capacidad de almacenar energía para recuperar las deformaciones y una estructura muy estable. Por otra parte, el asfalto endurecido tiene un buen comportamiento para Jnr y un aumento regular con el esfuerzo mayor (3200 Pa), aunque la respuesta elástica tiene una caída importante.

El nivel de tráfico para el cual el asfalto está preparado para desempeñarse de forma correcta se realizó para los tres asfaltos en estudio, los niveles de tráfico se establecen mediante el valor de Jnr que van para un tráfico estándar "S" con un valor de 2 a 4, apto para un tránsito menor a 3 millones de ejes equivalentes de 8,2 ton. Posteriormente, valores de 1 a 2 para un nivel de tráfico pesado "H", para un tránsito de 3 a 10 millones de ejes equivalentes. Un nivel "muy pesado" de "V" entre 0.5 y 1 y finalmente para niveles Extremos "E" valores menores a 0.5.

Como se observa en la **Tabla 2**, al modificar un asfalto convencional las propiedades que se pueden llegar a alcanzar a favor de una mejor calidad del mismo son muchas. Sin embargo, la prueba de desempeño del asfalto Grado PG puede resultar limitada para diferenciar algunos asfaltos modificados y su capacidad de almacenar energía para recuperar las deformaciones, además de las propiedades visco elásticas del mismo, que a diferencia del parámetro Jnr este nos arroja información importante y más precisa de la capacidad de desempeño de cada asfalto bajo la acción del tráfico. En la **Tabla 2** es evidente la diferencia que puede llegar a existir entre dos asfaltos clasificados mediante PG con la misma nomenclatura de 72 -22, pero con una capacidad de desempeño de más de 30 ESAI's para un asfalto modificado con polímero RET, mientras que para el asfalto endurecido apenas una capacidad de 3 a 10 ESAI's.

Tabla 2. Respuesta elástica en creep repetido, a 100 y 3200 Pa, Valores de Jnr y niveles de tráfico para los que el asfalto será capaz de soportar.

| Tipo de asfalto | Temp. De prueba | % er a 100 Pa | % er a 3200 Pa | Rdif (100Pa-3200 Pa) |
|-------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|----------------------|
| Ekbé Salamanca | 64 °C | 9 | 8 | 1 |
| Ekbé Salamanca + PPA | 76 °C | 37 | 7 | 30 |
| Ekbé Salamanca + polímero RET | 76 °C | 75 | 72 | 3 |
| Tipo de asfalto | Jnr 3200 | Grado | Intensidad de tráfico (ESAI's) | |
| Ekbé Salamanca | 1,001 | PG 64-22 H | >3< 10 millones | |
| Ekbé Salamanca + PPA | 1,053 | PG 76-22 H | >3 < 10 millones | |
| Ekbé Salamanca + polímero RET | 0,237 | PG 76-22 E | >30 millones | |

3.2 Caracterización del agregado y diseño de las mezclas

Recientemente fue creado por especialistas, usuarios y empresarios del asfalto en México una metodología llamada protocolo AAMAC PA-MA 01/2013 [11] en el cual se describe el procedimiento necesario para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras y por medio de este garantizar obtener altos niveles de desempeño. Ésta metodología se está empleando como normativa para el desarrollo de diferentes proyectos carreteros en México y por lo tanto servirá para el desarrollo del presente trabajo, abarcando hasta el nivel IV que se recomienda para tránsitos altos (mayores de 30 000 000 de ejes equivalentes de 8,2 toneladas) principalmente para carreteras federales y autopistas de cuota. Analizando dos parámetros muy importantes para este procedimiento como son módulos dinámico y leyes de fatiga.

Se tomó la decisión de analizar dos agregados representativos para México como son la Andesita y el Basalto, los cuales fueron tomados de dos bancos de materiales ubicados en la Ciudad de Morelia Michoacán y Tonalá Jalisco, respectivamente. La caracterización básica correspondiente al primer nivel del Protocolo. Esto se realizó con la intención de conocer las propiedades básicas de los agregados, por lo tanto los resultados se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Caracterización del agregado

| Prueba | Resultados | | Normativa |
|-------------------------|------------|----------|--------------|
| | Basalto | Andesita | |
| Grava | | | |
| Partículas alargadas | 1.60% | 5.62% | 15% máx. |
| Partículas Lajeadas | 0.34% | 1.77% | 15% máx. |
| Densidad | 2.66 | 2.62 | N/A |
| Desgaste de los Ángeles | 10% | 17% | |
| Absorción | 1.28 | 2.37 | N/A |
| Arena | | | |
| Equivalente de arena | 70 | 46 | 50 min. |
| Densidad | 2.6 | 2.53 | N/A |
| Absorción | 2.04 | 3.39 | N/A |
| Azul de metileno | 11 ml/g | 36 ml/g | 15 ml/g máx. |
| Angularidad | 40.72 | 36 | 40 min. |

Con el objetivo de contar con el menor número de variables entre los dos agregados y que las condiciones de comparación de propiedades como mezcla fueran lo más parecidas posibles se adoptó una granulometría para ambos agregados, la cual se muestra en la curva granulométrica de la **Figura 1**.

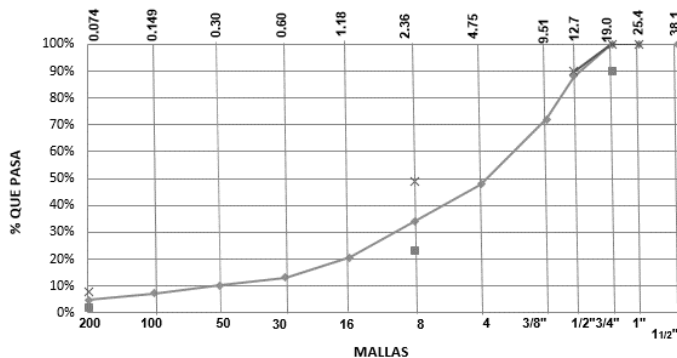


Figura 1. Curva granulométrica adoptada para el proyecto, en la que se representa, en el eje de las ordenadas el número de malla y en las abscisas el porcentaje de material retenido, además de los límites granulométricos

El diseño de la mezcla asfáltica densa se realizó de acuerdo a los parámetros establecidos por el protocolo "Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño" PA-MA-001/2013 [11] y cuenta con las características descritas en la **Tabla 4**. La intención con la que se diseñaron las mezclas era de tener la menor cantidad de variables entre ellas, por lo tanto se decidió que el contenido de vacíos fuera ligeramente diferente con el propósito de que el porcentaje de asfalto efectivo fuese igual y que de esta manera el asfalto contenido trabajase bajo las mismas condiciones en la mezcla compactada.

Tabla 4. Características principales de la mezcla compactada

| Característica volumétrica | Material | |
|---------------------------------------|---------------------|------------------|
| | Basalto Guadalajara | Andesita Morelia |
| Porcentaje de vacíos de la mezcla (%) | 4.60 | 3.85 |
| Porcentaje de asfalto efectivo (%) | 6.15 | 6.15 |
| Contenido óptimo de asfalto (%) | 6.2 | 6.2 |

3.3 Valores de módulo dinámico

Una vez determinada la fórmula de trabajo se procedió a la elaboración de especímenes cilíndricos de 15 cm de altura y 10 cm de ancho compactados en el compactador giratorio de SUPERPAVE con un número de giros igual a 125, mezclándose a una temperatura de 165°C y una compactación a 155°C, los especímenes se corrieron por triplicado y se promediaron para el análisis del módulo dinámico por lo que se obtuvieron las siguientes combinaciones:

- Ekbé Salamanca+ Andesita y Ekbé Salamanca + Basalto.
- Ekbé Salamanca + APP + Andesita y Ekbé Salamanca + APP + Basalto.
- Ekbé Salamanca + polímero RET + Ácido Polifosfórico (catalizador) + Andesita y Ekbé Salamanca + polímero RET + Ácido Polifosfórico (catalizador) + Basalto.

Para el módulo dinámico se ensayaron los especímenes en la prensa dinámica de acuerdo a la norma ASTM D 3497 usando las frecuencias de 10, 5, 1.0, 0.5, y 0.1 Hertz a una temperatura de 20°C con dos horas de acondicionamiento previas al ensaye obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5. Resultados del módulo dinámico en Mega Pascales (MPa) aplicado con frecuencias de 10 a 0.1 Hertz a probetas con una composición de Ekbé y asfaltos modificados, con agregados de tipo andesita y basalto de la ciudad de Morelia y Guadalajara respectivamente.

| Tipo de mezcla (componentes) | 10 Hz | 5 Hz | 1 Hz | 0.5 Hz | 0.1 Hz |
|--------------------------------------|-------|-------|------|--------|--------|
| Andesita | | | | | |
| Ekbé Salamanca | 8725 | 7707 | 4778 | 3856 | 2162 |
| Ekbé Salamanca + Acido Polifosfórico | 10030 | 8447 | 4931 | 3941 | 2167 |
| Ekbé Salamanca + Polímero RET | 10101 | 8786 | 5276 | 4261 | 2193 |
| Basalto | | | | | |
| Ekbé Salamanca | 10707 | 7727 | 4796 | 3926 | 2409 |
| Ekbé Salamanca + Acido Polifosfórico | 11211 | 9695 | 6150 | 4999 | 3224 |
| Ekbé Salamanca + Polímero RET | 12040 | 10071 | 6303 | 5389 | 2342 |

En el análisis de modulo Dinámico a las probetas compuestas principalmente con andesita se observa la tendencia de la disminución del valor de módulo a medida que la frecuencia va disminuyendo, así para una frecuencia alta de 10 Hz que simula un tráfico a altas velocidades, el valor es superior a los 10, 000 MPa para el caso del asfalto modificado y endurecido, mientras que para la frecuencia con mayor amplitud de carga (0.1 Hz), los valores se comportan de una manera similar para los tres tipos de mezclas, valores ligeramente por arriba de los 2, 000 MPa.

Para los módulos dinámicos compuestos por agregado basáltico los resultados son más favorables en comparación con la andesita por lo que se ve reflejado la importancia de contar con agregados de buena calidad. Así, para una frecuencia de 10 Hz los valores obtenidos son superiores a los 10, 000 Mega Pascales. Mientras que para la mezcla compuesta por Ekbé Salamanca, polímero RET y ácido polifosfórico la susceptibilidad a las deformaciones con el cambio de velocidad de aplicación de carga es menor. Los resultados a frecuencias bajas son muy similares por lo que indica el daño que realizan las cargas a bajas velocidades sobre el pavimento, comunmente presentados en reductores de velocidad, cruceros y vialidades con tránsito lento.

En la figura siguiente se observan las diferencias bien marcadas para las diferentes frecuencias en la que además se define a la frecuencia más baja como la más crítica para un pavimento. Entonces, es importante analizar las cargas a baja velocidad ya que en estos rangos de velocidad (velocidades bajas) se produce el mayor daño al pavimento, además se observa para las mezclas

que cumplen con los parámetros de caracterización que son las que muestran un mejor desempeño resultando en materiales con menos plasticidad y por ende, con menor relación esfuerzo-deformación.

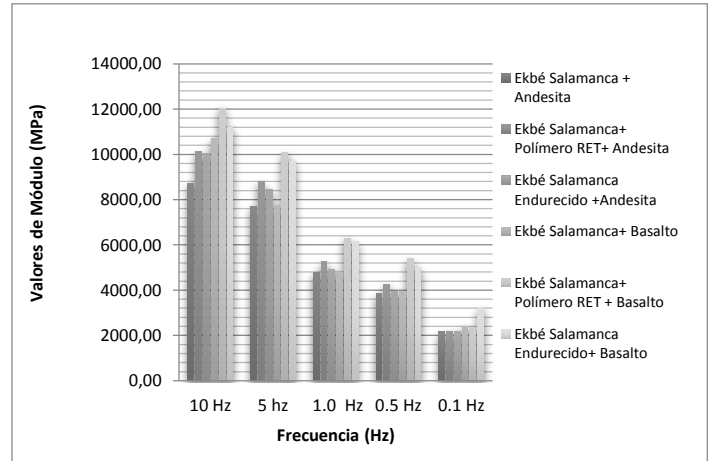


Figura 2. Gráfica general de los módulos dinámicos a frecuencias de 10 a 0.1 Hertz (de izquierda a derecha), los valores más altos para todas las frecuencias son los compuestos con basalto, asfalto modificado con polímero RET y el asfalto endurecido.

3.4 Prueba a fatiga de mezclas asfálticas

La prueba a fatiga se ha obtenido a partir de un ensayo de tracción indirecta. Esta se realizó bajo deformación controlada (μ -strain o micro-deformaciones) con micro-deformaciones de 750, 650 y 550 a una temperatura constante de 20°C con 120 minutos previos de acondicionamiento. En total se obtuvieron seis tipos de mezcla con tres pruebas de fatiga para cada una. Por otra parte, el criterio de falla se determinó cuando la probeta perdió el 50% de su módulo de rigidez inicial (criterio clásico).

Para las pruebas de fatiga de las mezclas asfálticas con agregado andesita es notable la diferencia para cada tipo de asfalto como componente que influye directamente en el comportamiento de la mezcla. Se observa en la **Figura 3** que el asfalto modificado con polímero RET es quien presenta un mayor número de repeticiones de carga para todos los casos y en el que la diferencia es pronunciada con respecto a las otras mezclas compuestas por asfalto endurecido y asfalto convencional. Es decir, resultará en una vida en número de ejes equivalentes o vida de proyecto mayor que las demás mezclas. Además, a diferencia de las pruebas de modulo dinámico la diferencia entre el asfalto endurecido y el asfalto modificado es notable. Se observa una mejora de más de 4 veces el número de repeticiones entre el asfalto modificado con Polímero RET y un asfalto convencional, esto para las microdeformaciones de 750 a 550 μ -strain.

En segundo término se realizaron las pruebas de fatiga de las mezclas asfálticas con agregado basáltico en las que de igual manera se realizaron bajo una temperatura de 20°C a 750, 650 y 550 micro-deformaciones y dos horas previas de acondicionamiento bajo la temperatura de prueba. Para las leyes de fatiga con basalto, el tipo de asfalto se refleja en los resultados en el que se observa una clara diferencia para la mezcla con asfalto modificado. Además, el número de repeticiones sobrepasa los 400 000 ciclos de repetición de carga por lo que se reflejará en un pavimento más durable que tendrá una vida a fatiga mucho más prolongada que los demás tipos de asfalto.

A continuación en la **Figura 3** se comparan todas las mezclas en la que se grafica el número de repeticiones de carga para cada micro-deformación (μ -strain) y tipo de mezcla.

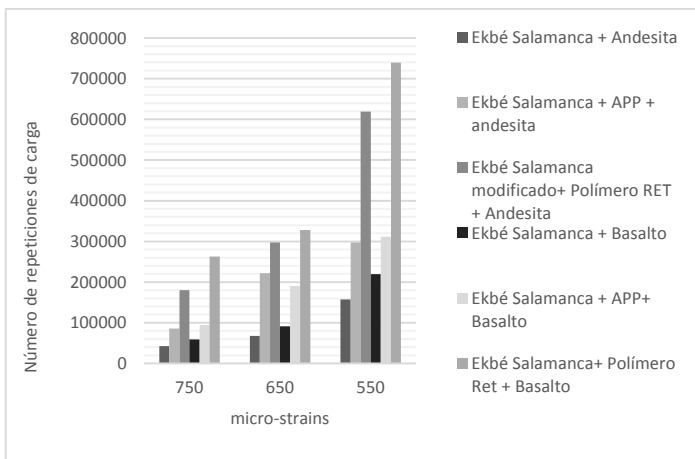


Figura 3. Número de repeticiones de carga para cada tipo de mezcla y micro-deformación.

En esta grafica se observa el aumento de repeticiones de carga con el uso de asfaltos modificados casi 7 veces comparando una mezcla compuesta por agregados de mala calidad y un asfalto convencional, entre una mezcla compuesta por agregados de buena calidad y un asfalto modificado con Terpolímero RET. Mientras que comparando las mezclas que cuentan con agregados de buena calidad con el uso de asfalto modificados entre ellas aumenta el número de repeticiones hasta en un 300%. Por lo que es evidente el aporte del asfalto modificado en este parámetro de vida a fatiga.

Además es importante mencionar la importancia de tener agregados y asfaltos que cumplan con todos los estándares establecidos para dicho elemento ya que el número de repeticiones de carga se puede elevar a 6 veces en comparación de un asfalto convencional de acuerdo a este trabajo.

3.5 Análisis de vida útil y costo de secciones de pavimento empleando los valores de módulo y leyes de fatiga obtenidos

La obtención de módulos dinámicos y leyes de fatiga ha sido un tema con poco desarrollo dentro de la ingeniería mexicana. Sin embargo, en este trabajo de investigación se obtuvieron varios resultados con dos agregados típicos de México (basalto y andesita), para lo cual se analizaran dentro de un par de secciones de pavimento para intensidades de tráfico pesado y ligero, en las que los espesores son definidos de acuerdo al catálogo español (MOPU, 1989) [13]. Los módulos dinámicos obtenidos en este trabajo fueron introducidos para la capa asfáltica dentro de la sección de pavimento, ensayados a una frecuencia de 10 Hz, la cual simula una velocidad de aplicación de carga de un vehículo circulando a 70 km/h aproximadamente. Por otra parte, los valores de VRS (Valor relativo de Soporte), fueron tomados de las recomendaciones de la "Publicación técnica No. 104" del Instituto Mexicano del Transporte [6]. En este apartado analizaremos dos secciones de pavimento obtenidas a partir del catálogo español en el que se tienen 4 capas de arriba hacia abajo: carpeta asfáltica, base, subrasante y terraplén. Además se obtendrán sus dimensiones y características básicas. Las razones por las que fueron tomadas las secciones del catálogo español son fines prácticos, y es porque es una metodología que presenta esta selección de secciones de pavimento para intensidades de tráfico alto y baja de manera sencilla y rápida. Los espesores y características para cada tipo de capa son presentados a continuación:

Tabla 6. Capas adoptadas para el proyecto y sus características básicas y espesores en centímetros para las secciones adoptadas. Los valores de VRS son los máximos permitidos por la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

| Nombre de la capa | Espesores (cm) | | | Valor máximo de VRS (SCT) | |
|--------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------------------|-------|
| | *Sección 121 | *Sección 4221 | *Sección 3221 | | |
| Carpeta asfáltica | 30 | 5 | 15 | (N/A) | (N/A) |
| Base | 25 | 25 | 35 | 100 | 120 |
| Sub rasante | 35 | 35 | 35 | 20 | 20 |
| Terraplén | 200 | 200 | 200 | 5 | 20 |

*Sección 121: sección para más de 30 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

*Sección 4221: sección para menos de 5 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

*Sección 3221: sección para 10-20 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

Estas características serán con las que se analizará para obtener el tipo de explanada en el catálogo español. Por lo que el tipo de explanada adoptado para las dos intensidades será "tipo E2" y de acuerdo al valor de VRS igual a 20 se procede a elegir el tipo de material que para este caso corresponde a un suelo seleccionado

(3). Los tipos de secciones adoptadas son “T1” y “T42” para una intensidad de tráfico alta y baja respectivamente para la base y capa asfáltica. Por lo que las secciones de pavimento quedan conformadas como se expresan en la **Tabla 6**. Bajo estas dimensiones serán analizadas ambas secciones con el software DISPAV-5 con el objetivo de analizar los diferentes módulos obtenidos bajo una frecuencia de 10 Hz para todas las combinaciones de mezclas asfálticas obtenidas en este trabajo de investigación. Además, de obtener los esfuerzos obtenidos en las capas inferiores y la vida a fatiga.

3.6 Análisis de desempeño de secciones de pavimento en DISPAV-5

El procedimiento se realizó en el software DISPAV-5 desarrollado por la UNAM, el cual permite el cálculo de la vida previsible por deformación y por fatiga de pavimentos previamente establecidos. El procedimiento consiste en: Elección del tipo de carretera: para este caso, se seleccionó una carretera de altas especificaciones. Las capas consideradas y los espesores: Los espesores y capas seleccionadas se especifican en la **Tabla 6**. Nivel de confianza del proyecto: en cuanto al nivel de confianza se propuso un 85% al ser sugerido por el manual y que además se considera adecuado para el proyecto.

Tabla 7. Vida a fatiga para las estructuras de pavimento flexible con diferentes valores de módulo dinámico de la carpeta asfáltica, para este caso el análisis se hizo para la carpeta asfáltica por fatiga y las capas granulares para deformación.

| Tipo de capa | Vida previsible para módulo dinámico a 10 Hz= 8725 MPa (Ekbé Salamanca) | | |
|-------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| | Deformación o fatiga sección 4221 | Deformación o fatiga sección 3221 | Deformación o fatiga sección 121 |
| | Andesita | | |
| Carpeta asfáltica | 4.7 | 32.8 | >150 |
| Base | 6.1 | >150 | >150 |
| Sub rasante | 1 | 58.3 | >150 |
| Terraplén | 0.2 | 3.2 | >150 |
| Basalto | | | |
| Carpeta asfáltica | 6.5 | 55 | >150 |
| Base | 8.5 | >150 | >150 |
| Sub rasante | 1.2 | 84.1 | >150 |
| Terraplén | 0.3 | 4 | >150 |

| Tipo de capa | Vida previsible para módulo dinámico a 10 Hz= 10030 MPa (Ekbé+ APP) | | |
|-------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|
| | Deformación o fatiga sección 4221 | Deformación o fatiga sección 3221 | Deformación o fatiga sección 121 |
| | Andesita | | |
| Carpeta asfáltica | 5.8 | 46.6 | >150 |
| Base | 7.6 | >150 | >150 |
| Sub rasante | 1.1 | 74.7 | >150 |
| Terraplén | 0.3 | 3.7 | >150 |
| Basalto | | | |
| Carpeta asfáltica | 7 | 62 | >150 |
| Base | 9.2 | >150 | >150 |
| Sub rasante | 1.3 | 91.5 | >150 |
| Terraplén | 0.3 | 4.3 | >150 |
| Tipo de capa | Vida previsible para módulo dinámico a 10 Hz= 10101 MPa (Ekbé + polímero RET) | | |
| | Deformación o fatiga sección 4221 | Deformación o fatiga sección 3221 | Deformación o fatiga sección 121 |
| | Andesita | | |
| Carpeta asfáltica | 5.9 | 47.4 | >150 |
| Base | 7.7 | >150 | >150 |
| Sub rasante | 1.1 | 75.7 | >150 |
| Terraplén | 0.3 | 3.8 | >150 |
| Basalto | | | |
| Carpeta asfáltica | 8 | 74.8 | >150 |
| Base | 10.5 | >150 | >150 |
| Sub rasante | 1.4 | 104.4 | >150 |
| Terraplén | 0.3 | 4.7 | >150 |

Como se observa en la **Tabla 7** el DISPAV-5 no presenta sensibilidad para estructuras con espesores de carpeta que sobrepasan los 30 cm de espesor, además de que los diferentes módulos de las carpetas asfálticas no se ven reflejadas en la vida a deformación y por fatiga ya que solo presenta un resultado mayor a 150 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas (observar columnas en orden de izquierda a derecha 4, 7 y 10).

Los resultados son similares para ambos materiales. Sin embargo, las diferencias debieran reflejarse en las vidas a fatiga en las que las mezclas con mayor módulo presentarían mayores horizontes de vida.

Para la “sección 3221” del catálogo español que es una sección más esbelta en comparación con la “121” se obtuvieron resultados muy interesantes principalmente para la mezcla con basalto que presenta una vida útil mayor a la andesita (**Tabla 7**). Comparando la mezcla de basalto con asfalto modificado con la mezcla de Ekbé con andesita se obtiene una vida a fatiga de más del doble de vida útil (2.28 veces más). Además, comparando asfaltos modificados pero con agregados diferentes, en este caso el basalto (pétreo con mejores propiedades que la andesita), sobrepasa la vida a fatiga en un 37% por lo que de acuerdo a estos resultados en estructuras con espesores más robustos la vida a fatiga tiende a ser más larga y depende de manera más directa de la calidad de los agregados y del asfalto.

Para un diseño en el DISPAV-5 con una estructura de pavimento con espesores más esbeltos, primeramente se observa una importante diferencia entre los resultados para ambos tipos de agregado en el que el agregado con mejores características presenta en general mejores resultados en la vida a fatiga y deformación. Con respecto a los valores de módulo de las diferentes mezclas, se observa que el asfalto modificado aumenta hasta en un 25% la vida a fatiga con respecto al asfalto convencional y un 14% con respecto al asfalto endurecido para el caso del basalto. Por otra parte, el efecto del polímero RET aumenta la vida a fatiga entre un material pétreo a otro un 35%, evidenciando la importancia de contar con un asfalto y agregado de buena calidad en la mezcla. Además, el DISPAV-5 refleja datos con menor diferencia entre secciones de las mismas dimensiones pero con módulos de rigidez de carpeta diferentes.

3.7 Análisis de costos de las secciones de pavimentos adoptadas.

El objetivo de este apartado es conocer el impacto económico de cada una de las capas dentro de la estructura del pavimento, en especial el costo del agregado y asfalto en la capa de rodadura por lo que algunas inversiones pequeñas podrían resultar en pavimentos de mejor calidad. En este apartado se analizaron los costos de las secciones adoptadas para el análisis de vida útil a fatiga. Para esto, se propuso un ejemplo de una obra de una carretera de un kilómetro de longitud con 10 metros de corona (3.5 m por carril y 1.5 m de acotamiento, por sentido de circulación), para la cual se analizan 3 secciones de pavimentos (sección del catálogo español: 121, 4221 y 3221). Además se supondrá una distancia de acarreo del banco de materiales a la obra de 5000 metros.

Se observa que en todas las estructuras el costo de las capas granulares sobrepasa el 95% del total del costo del pavimento. Sin embargo, de acuerdo a lo analizado en temas anteriores de este trabajo quien tiene un mayor aporte estructural es la mezcla asfáltica, por lo que las diferencias entre la modificación y no modificación del asfalto resulta trascendental. El incremento de costo entre un asfalto convencional y un asfalto modificado para este tipo de estructura apenas alcanza el 5.5 por ciento del costo total de la mezcla asfáltica, mientras que en el costo total del pavimento apenas alcanza el 1%.

Tabla 8. Análisis de costo de las secciones de pavimento adoptadas para el análisis a vida por fatiga y deformación en la que se visualiza el impacto económico que genera el uso de asfaltos modificados y su pequeño impacto en el costo total de la obra para cada sección de pavimento. Los análisis para este caso están en dólares estadounidenses (USD)

| Sección 4221 | | | |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Basalto + | | | |
| Concepto | Ekbé Salamanca | Ekbé + APP | Basalto+ Ekbé + Polímero RET |
| Mezcla Asfáltica | \$2,877 | \$2,930 | \$3,042 |
| Base | \$617,103 | \$617,103 | \$617,103 |
| Subrasante | \$751,075 | \$751,075 | \$751,075 |
| Terraplén | \$3,638,810 | \$3,638,810 | \$3,638,810 |
| Costo Total | \$5,009,865 | \$5,009,918 | \$5,010,030 |
| Andesita+ | | | |
| Concepto | Ekbé Salamanca | Ekbé + APP | Ekbé + Polímero RET |
| Mezcla Asfáltica | \$2,862 | \$2,915 | \$3,027 |
| Base | \$584,795 | \$584,795 | \$584,795 |
| Subrasante | \$727,206 | \$727,206 | \$727,206 |
| Terraplén | \$3,375,756 | \$3,375,756 | \$3,375,756 |
| Costo Total | \$4,690,619 | \$4,690,672 | \$4,690,784 |
| Sección 121 | | | |
| Basalto + | | | |
| Concepto | Ekbé Salamanca | Ekbé + APP | Ekbé + Polímero RET |
| Mezcla Asfáltica | \$7,833,087 | \$7,978,861 | \$8,282,557 |
| Base | \$617,103 | \$617,103 | \$617,103 |
| Subrasante | \$751,075 | \$751,075 | \$751,075 |
| Terraplén | \$3,638,810 | \$3,638,810 | \$3,638,810 |
| Costo Total | \$12,840,075 | \$12,985,849 | \$13,289,545 |

| Andesita + | | | |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Concepto | Ekbé Salamanca | Ekbé + APP | Ekbé + Polímero RET |
| Mezcla Asfáltica | \$7,793,115 | \$7,938,890 | \$8,242,586 |
| Base | \$584,795 | \$584,795 | \$584,795 |
| Subrasante | \$727,206 | \$727,206 | \$727,206 |
| Terraplén | \$3,375,756 | \$3,375,756 | \$3,375,756 |
| Costo Total | \$12,480,872 | \$12,626,646 | \$12,930,342 |

Lo más importante y destacado de este análisis es que incrementando el costo total inicial de la obra (apenas el 1%), en la modificación de asfalto se puede llegar a aumentar la vida útil, o hasta en un 23% de la vida útil inicial (1/4 de vida más). Mientras que comparando una mezcla compuesta con un agregado que cumple con los parámetros requeridos y usando en esa mezcla un asfalto modificado el comportamiento comparado al de una mezcla con agregados de mala calidad y asfalto convencional la vida de un pavimento se puede llegar a aumentar hasta el doble con el simple hecho de usar componentes de buena calidad. Es por eso que resulta más que adecuado el utilizar asfaltos modificados en este tipo de estructuras. Para la sección 121, en la que se tienen espesores de pavimento más robustos de carpeta asfáltica y en la que por consecuencia los costos se elevan. Cabe mencionar que para esta sección el DISPAV-5 no pudo obtener resultados de vida a fatiga por lo que no se tiene una referencia exacta de cuanto puede afectar en una mejor vida a fatiga. Sin embargo se tiene como referencia la sección 3221 la cual cuenta con una sección más robusta que la sección 4221 del catálogo español y que cuenta con resultados muy interesantes. Ya que para una sección con los mismos tipos de materiales pero con el uso de asfaltos modificados en comparación con un asfalto convencional la vida útil se incrementa hasta el 40% lo que hace suponer que para secciones más robustas los resultados en el DISPAV-5 de la vida útil comparando asfaltos modificados y convencionales tendería a crecer a favor de los asfaltos modificados. Es así como en este capítulo analizamos las vidas a fatiga y la importancia del uso de asfaltos modificados en la actualidad tomando en cuenta el bajo costo de inversión y su gran aportación dentro del desempeño de la estructura del pavimento.

4. Conclusiones

El parámetro "Jnr" presentó una tendencia en los resultados muy similar a los obtenidos en las leyes de fatiga y módulo dinámico. A pesar de ser una prueba propia del asfalto, el panorama que nos ofrece a partir de sus resultados es de mucha utilidad para poder tener una idea de lo que el asfalto puede llegar a soportar.

El módulo de las mezclas asfálticas se ha convertido en un parámetro fundamental en diversos métodos de diseño de pavimentos flexibles, por esta razón forma parte de los requisitos solicitados por el protocolo AMAAC para diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño, que ha sido adoptado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), para la mayor parte de sus proyectos de construcción y rehabilitación de pavimentos.

A pesar de todo esto, en México se cuenta con poca experiencia en la medición de Módulos en mezclas asfálticas, razón por la cual se tomó la decisión de realizar esta investigación. Pudimos observar que el ensayo de módulo dinámico a pesar de su mayor duración tiene mayor sensibilidad y muestra claramente la diferencia de la calidad de los agregados empleados así como la calidad del asfalto.

Finalmente se ha comprobado que el uso de asfaltos modificados y un agregado de buena calidad aumentan la vida útil hasta en un doble de vida en comparación a un asfalto convencional y un agregado de mala calidad. Además, el uso de asfaltos modificados solo incrementa el costo inicial en uno por ciento lo que está más que claro que el uso de asfaltos modificados no solo aumenta la vida a fatiga sino que ahorra los costos de mantenimiento y reparación en la estructura.

5. Referencias

- [1] Huang, Y. Pavement Analysis and Design (2a ed.). University of Kentucky: prentice Hall.
- [2] Zarate, M. Diseño de pavimentos flexibles (3a ed.). México D. F: AMAAC.
- [3] McGennis, R. Shuler, S. Bahia, H. (1994). Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE (1a ed.). Lexington KY: Asphalt Institute.
- [4] McGennis, R. Anderson, M. Kennedy, T. Solaimanian, M. (1994). Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE (1a ed.). Lexington KY: Asphalt Institute.
- [5] Corro, S. Prado, G. (1998). Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. México D. F: instituto de ingeniería de la UNAM.
- [6] Rico, A. Téllez R. Garnica P. (1998). Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodología, de Diseño y Tendencias. Publicación Técnica No. 104 Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.



- [7] Sandoval I., Cremades I., "Determinación del grado de desempeño del asfalto usando como parámetro de especificación la viscosidad a corte cero", IV Congreso Mexicano del Asfalto, Agosto 2005.
- [8] Sandoval I. Cremades I., "Caracterización de asfaltos mediante creep repetido multiesfuerzo en reómetro de corte dinámico". V Congreso Mexicano del Asfalto, Agosto 2007.
- [9] American association of state highway and transportation officials (AASHTO). T350 "Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)", Washington DC, USA, 2014.
- [10] Federal highway administration (FHWA-HIF-11-038). "The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure", Office of pavement technology, Abril 2011.
- [11] PA-MA 01 (2013³). diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño (AMAAC).
- [12] DISPAV-5 (1998). Método de diseño de pavimentos flexibles (UNAM)
- [13] Ministerio de Obras Públicas.- Instrucción 6.1-I.C y 6.2-I.C, Secciones de Firme; Catálogo de Diseño MOPU.- España, 1990.



Prefeasibility Study for a Continuous-Production Carbon Nanotube Plant in Bogota and Suburban Areas. Estudio de prefactibilidad de una planta, para la producción continúa de nanotubos de carbono en Bogotá y municipios aledaños.

Fredy Alberto Reyes L.¹, Iván Sequera², Didier Pinzón², Andrea Rengel²

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación (Centro de Estudios en Carreteras Transporte y Afines - CECATA), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

²Facultad de Ingeniería Civil, Programa de Maestría en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

fredy.reyes@javeriana.edu.co, teléfono: (57-1)-3208320 Ext. 5270

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Article history:

Received
30-01-2017
Accepted
18-08-2017
Available
17-10-2017

Keywords:
Carbon Nanotubes
Pre-feasibility
Study
Production Plant

Historial del artículo:

Recibido
30-01-2017
Aceptado
18-08-2017
Publicado
17-10-2017

Palabras Clave:
Estudio de
prefactibilidad
Nanotubos de
Carbono
Planta de
producción

Abstract

Currently, it is evident the need to have materials with better specifications, which guarantee a long useful life of structures. In the last 10 years, nano-structured materials have been involved to improve the properties of asphalt mixtures and cementitious matrices, since the carbon nanotubes (NTC) allow to obtain an integral increase of the properties of pavements surpassing any type of modifier previously studied. Although the first world countries dominate the market, in Colombia the production of these nano-materials is emerging. Therefore, this paper studies the possible domestic production of large amounts of NTC needed to modify building materials and infrastructure. This work serves as input for a feasibility and construction of a future NTC production plant, That is, it determines whether it is possible to produce it lower costs than those proposed by the world market.

Resumen

En la actualidad, se evidencia la necesidad de contar con materiales con mejores especificaciones, los cuales garanticen una larga vida útil de las estructuras. En los últimos 10 años, se han involucrado materiales nanoestructurados con el fin de mejorar las propiedades de mezclas asfálticas y matrices cementantes, dado que los nanotubos de carbono (NTC) permiten obtener un aumento integral de las propiedades de los pavimentos superando cualquier tipo de modificante anteriormente estudiados. A pesar de que los países primermundistas dominan el mercado, en Colombia la producción de estos nano-materiales está surgiendo. Por lo tanto, este trabajo estudia la posible producción doméstica de las grandes cantidades de NTC necesarias para modificar materiales de construcción e infraestructura. Este trabajo sirve de entrada para una factibilidad y construcción de una futura planta de producción de NTC, es decir, determina si es posible producir a menores costos de los que propone el mercado mundial.

1. Introduction.

At present, there is a pressing need to develop materials with better specifications to enhance the service-life of structures. Therefore, existing materials, such as concrete and asphalt, have been tested with various additives to reinforce cementing matrices and thereby develop high-performance materials [10]. Over the last five years, nano-structured materials such as Carbon Nanotubes (CNT) have been used to achieve a comprehensive improvement in material properties [1][4][5][12][17][18][19][21]. In Colombia, the production of these nano-materials is relatively recent [7][15][16]. Most of nano-materials, internationally speaking, are sold by first-world nations. The limited production in Colombia is confined to the academic sphere, since the synthesis or production of these nano-structures is expensive and production yields are currently low [6]. Take, for instance, the use of nano-materials in Colombia's academic field: 10 gr or less are produced daily. In this context, it is important to study the feasibility of industrial-level production given that, as explained in studies such as that of [7], CNT comprehensively improves pavement properties—and its improvements outstrip any modifier here to fore studied. A recent study underscores these results for CNT when added to cement paste [11]. Given such benefits, the present study is concerned with the production of large quantities of CNT, which are needed to modify construction and infrastructure materials and require industrializing the production of this nano-material.

Since the past decade, interest has been shown in improving construction materials by using nano-structured materials; of these materials, CNT stands out [9]. This research serves as a preliminary study of the feasibility of building a CNT production plant; it aims to determine if it is possible to produce CNT at costs lower cost than on the international market— especially since prices on the international market fluctuate (24 to 120 \$/Gr) as a factor of CNT production and configuration. [14][20]

2. Data (Model Inputs).

2.1 Technical Diagnosis.

In this technical-economic diagnostic, the use of CNT was evaluated in asphalt mixes and mortars, as recommended by the

Table 2: Cost Estimates of Additives in 1m³ of Mortar with 40 MPa of Compressive Strength

| Addition | Compressive Strength (Mpa) | Addition Cement Weight (%) | Cementant Weight (Kg/m ³) | Addition Weight (Kg) | Unit Price (\$Cop/Kg) | Total Price (\$Cop/m ³) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| NANOSILICA | 40 | 5 | 450 | 22,5 | \$ 2.639,00 | \$ 59.377,50 |
| SILICA FUME | 40 | 15 | 450 | 67,6 | \$ 324,80 | \$ 21.956,48 |
| NANO ALUMINA | 40 | 4 | 450 | 18 | \$ 852,60 | \$ 15.346,80 |
| CARBON. NANOTUBES | 40 | 0,01 | 450 | 0,05175 | \$ 1.015.000,00 | \$ 52.526,25 |

*Note: The prices used are the Colombian market in 2014.

existing scientific literature on the topic. For asphalt mixes, a cost comparison between different types of polymer additives was done. Results highlight the unsustainability of adding CNT at current production prices in Javeriana University - Colombia (3.6 \$/Gr). The following in price increase (%) were relative to mixes without additives (**Table 1**). But, the fatigue strength, the dynamic module and the useful life are improved. [15]

Table 1: Unit Prices (m³) of MDC-2 Mix with Different Additives

| Price without addition | \$ | 512,360 | Rising % |
|-----------------------------|----|------------|----------|
| Price with addition of CNT | \$ | 13,224,257 | 2481% |
| Price with addition of SBS | \$ | 570,101.00 | 11% |
| Price with addition of SBR | \$ | 576,771.00 | 13% |
| Price with addition of EPDM | \$ | 543,455.00 | 6% |
| Price with addition of EVA | \$ | 554,561.00 | 8% |
| Price with addition of PE | \$ | 541,234.00 | 6% |
| Price with addition of PP | \$ | 537,902.00 | 5% |

* Total unit price proximate to COP value.

Additives dimensioned in **Table 1** are: carbon nanotubes (CNT), styrene-butadiene-styrene (SBS), Styrene-Butadiene Rubber (SBR), Ethylene Propylene Diene Type M ASTM (EPDM), ethylene vinyl acetate (EVA), polyethylene (PE), polypropylene (PP).

For an asphaltic mixture 5.5% of asphalt and polymer values of 1 to 5% [13][17]. Additionally, a comparison of the technical improvements (Fatigue, Dynamic Module and Rutting) offered by modified asphalt mixes were performed. In so doing, CNT was demonstrated to be the only additive that comprehensively improves material properties (compared to other polymer additives) [7][15]. Although CNT requires higher initial costs, savings can be seen in reduced maintenance programs in Bogota, Colombia: in an analysis of the city's Mobility Master Plan (Instituto de Desarrollo Urbano, IDU) lays out the significant investment required to meet the maintenance demands of the city's transportation network.

When adding CNT to mortar mixes, the low ratio of additive relative to cement weight (**Table 2**) meant that this process could be viable at market prices and could compete with products such as nano-silica, silica fumes and nano-alumina.



2.2 Market Diagnosis.

In this second diagnostic, market diagnostics were investigated, both for CNT and its byproduct, Hydrogen. For the former, current production was examined in the form of the prototype from the Pontificia Universidad Javeriana (PUJ); this prototype was taken as which would be developed at industrial scale.

Currently, PUJ's production is 10 gr/day, which is far from the quantity needed for engineering purposes. An analysis of potential clients was carried out in line with market segmentation theory, which suggests that, hypothetically, cement producers and the country's only asphalt producer (Ecopetrol) would be possible potential clients for CNT. Likewise, an analysis of potential clients as possible clients for CNT was carried out. In the

diagnostic of the possible demand for CNT, the survey tool was not considered: on one hand, in Colombia, the product has not been marketed, and on the other, international data on this material is of industrial supply because its novelty. The criteria used to define CNT demand was the method of attraction of demand meant for large-scale specific industrial and academic uses, for it is an input in the financial model. CNT percentages were defined as percentages of asphalt and cement production in the country according to percentages used in modifying materials (2% of asphalt weight and 0.0115% of cement weight) [7][11]. Based on this analysis, it was concluded that the possible daily demand for CNT would be 4,500 gr. From there, the suppliers for material production were evaluated and the SWOT matrix methodology was applied, because CNT is a new product on the Colombian market. Using this matrix, production strategies that stayed within reasonable budgets were generated (**Table 3**).

Table 3: Feasible Strategies as Determined by the SWOT Matrix

| FEASIBLE STRATEGY | JUSTIFICATION |
|---|--|
| Show the project in private and government business wheels. | It is necessary to disclose the product, in the productive sector and other sectors. |
| Seek oportunities to export the product for Latin America an the Caribbean. | Having such a case, demands that the country doesn't have any or have very low. |
| Increase production levels to reach breakeven. | To meet the demands that are taken at the time of the high consumption of the product. |
| Increase the production base to different plants, inside and outside of the city, to complite production at the time of an international constant demand. | Clambering in the market, incresing the product base with different production branches. |
| Reaching a competent gram price, proving the savings that it has in terms of maintaining modificate structures with CNT | It is necessary to find a competitive and sustainable price as this is an investment project. |
| . Encourage the academic research based on the early work developed in the topic CNT materials like asphalt and cement. | Only academic research can be obtain the real tecnicos conclusions, of how work the product as an adition to other. |
| To introduce the product and its properties and benefits to different producing companies of aspfalt and cement in the country. | It is absolutely necessary introduce the product, because in general in the world, is a leading edge issue that is not understood in all its magnitude |

Hydrogen is regarded as a viable alternative in the energy field on account of its high calorific properties and low environmental impact (reduced CO₂ emissions). The current market exhibits low demand for Hydrogen relative to oil and coal. Yet, over the last few years, a sales spike of 650% has been observed for products such as hydrogen cells, which are mainly used in portable batteries, fixed batteries and transportation (Fuel Cell Today), with the estimated scale-model production, it is crucial to look at the niche market at which the product is directed, as well as its region of influence. According to data published by a global

energy Company "British Petroleum" in their report "Statistical Review of World Energy," the energy demand in North America and Latin America is 72 million tons of fuel per year, of which roughly 30% is demand for renewable energy.

Departing from this premise, the estimated production was analyzed for various options—due to the structure of each model—and linked to the production of CNT—because of that hydrogen is a byproduct of plant's continuous production of CNT.

2.3 Field Phase.

In this phase, the ideal location of the plant was determined to abide by parameters chosen in accordance with the plant's requirements and the economic impact of the investment required for the plant itself. Parameters included: Cheap Land Price, Availability and Continuity of Provision of Electricity, Availability and Continuity of Water and Sewage, Stable Topography, Minimal Land Use Issues. To this end, a geoprocessing tool (GVSIG) was employed, relying on data from different sources (Local Mayoral Offices, Bogota's Water and Sewage Authority, CODENSA S.A., E.S.P, IDECA – Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, State's Governing Office, IGAC, SIGOT – Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial and INVIAS). The georeferenced model contained the following levels of data: Contour Lines for the state of Cundinamarca (Scale 1:100.000), National, Regional and Municipal Roads, Electricity Grids for Voltage Levels of 11.4KV – 34.5KV, Matrix Distribution Networks of Potable Water and Sewage, Land Valuation and Terrain Types. As a result of overlay data analysis and in addition to the consideration of topographical restrictions, land costs, proximity to public services and road access, four options were established. The first and second were located within 200m of the Bogotá – Sogamoso Highway (National Route 55), in the municipalities of Tocancipa and Sopó, respectively. The third option was located inside Bogotá's city limits, in the industrial district near 13th Street, near the Bogota River. The fourth and final option was within 200m of the Bogotá – Fusagasugá Highway (National Route 45^a) in the municipality of Sibaté. As decision-making parameters for these options, the cost of land and proximity to suppliers and clients were considered. Consequently, the third option was chosen (Fontibón, Bogotá D.C, 200m from Calle 13); see Figure 1 for more information.

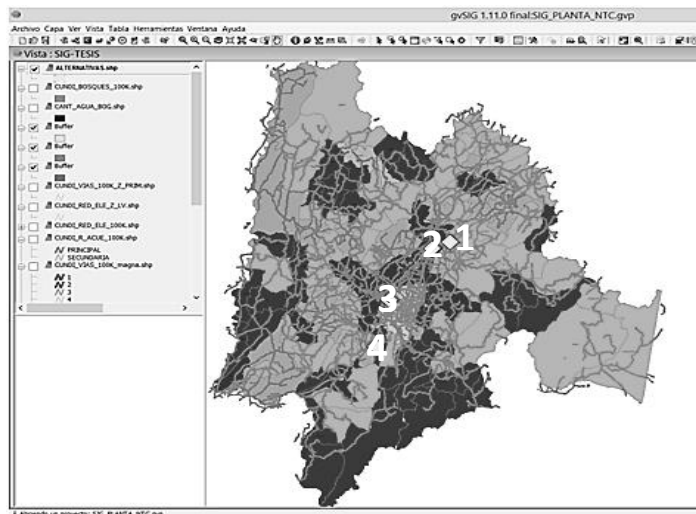


Figure 1: Final Options for Plant location.

- Alternative 1 y 2: Tocancipá and Soup - 100 m from the Briceño, Tunja, Sogamoso Concession.
- Alternative 3: Fontibón (Bogota D.C) - 100m from Calle 13.
- Alternative 4: Sibaté - 100m from the Bogota - Girardot Highway Concession.

2.4 Propositive Phase.

In the last phase before financial evaluation, three essential parts of the engineering logistics were analyzed: i) distribution, ii) supply and iii) production. With these parts, it was possible to arrive at more accurate details on the potential commercialization of CNT in Colombia. As part of this analysis, transportation, packing, supply and distribution methods and policies, supplier location and product storage were all described. In the section of production (the last section), three options were evaluated, while accounting for production scales of the PUJ's actual prototype, capital expenditure (CAPEX) and operational expenditure (OPEX). These three options were divided as follows:

Option 1 (Independent Producers): Multiplication of the current process by which CNT is presently produced at the PUJ. The current model would be used and multiplied by 150 independent assemblies in order to meet the demand of 900 daily assemblies, each producing 5 gr, for a total of 4500 gr/day of gross production

Option 2 (Assembly Line): Like a production chain with different phases (Assembly, Heating, Cooling, Assembly and Cleaning). The current model's design was modified to meet demand—using less infrastructure and equipment—for 900 daily assemblies that produce 5 gr each, for a total of 4500 gr/day of gross production. CNT would be produced in the same tubes used in Option 1, though the number of tubes would be increased to 6 tubes in each of the 5 muffles, with 5 stations. Factoring in the 6 daily assemblies, gross production would be 4500 gr/day.

Option 3 (Large-scale): Established via an unreal large-scale schematic interpolation of the PUJ's CNT prototype. To achieve this, the current model was used and production areas equal to those found in a quartz tube were determined. This would match the gross production of 900 assemblies that produce 5 gr each (for a total of 4500 gr/day) with significantly less infrastructure and equipment. Pursuing Option 3, it would be possible to produce CNT in quartz sheets; for this option, 25 sheets to be exact. These sheets would be placed in a cubic oven covered with ceramic plates that would be heated by means of electrical resistors. The catalyzer would be introduced over the area of the quartz and through the CH₄ passage on the top of the oven in which CNT would be produced.

As a salable byproduct, 16,200 L of hydrogen would be produced daily: each assembly generates 18 L of hydrogen during CNT production. Sales were calculated based on these values.

An additional benefit of this study came in the form of analyzing buildings internal layout in 3D. Such analysis clearly demonstrated the different areas of each plant option with a great level of architectural detail. To this end, AUTODESK REVIT® was used, considering that these models were used to estimate quantities and costs for the initial investment (CAPEX).

Using cost analysis, the following ordering was obtained for each option (Figures 2 and 3):

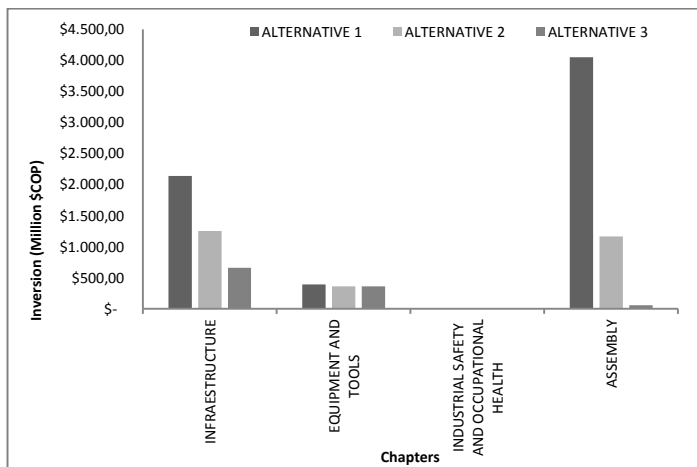


Figure 2: CAPEX Variation per Chapter.

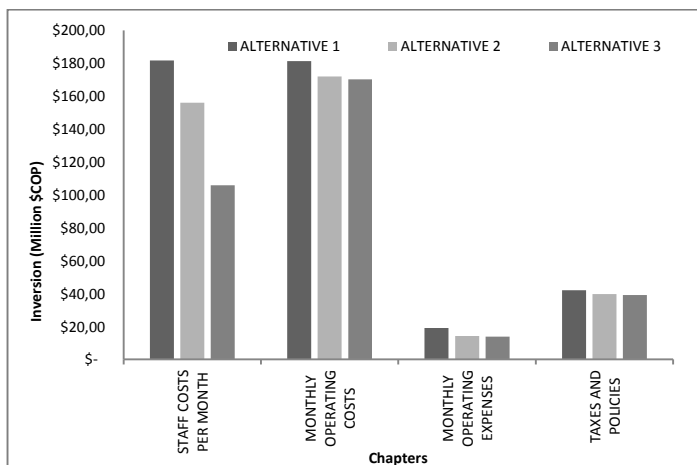


Figure 3: OPEX Variation per Chapter.

As can be seen in Figures 2 and 3, each option reduced costs relative to the immediately preceding option in each of the proposed and evaluated chapters.

3. Methodology.

To determine the project's feasibility, it is crucial to show stakeholders that the project offers an economic, financial and social opportunity within a reasonable time-span. For the options, time boundary was defined as 10 (ten) years (before reinvestment). Here, cost and financial evaluation were vital to demonstrating the feasibility of building a CNT plant.

The only objective of financial evaluation is profit or benefits for an actor (public or private entity). In financial evaluation, resources are allotted to different applications. Cornerstones of financial evaluation include: cash flow, conditions for money flow, Capital Expenditures (CAPEX), operational expenditure (OPEX), sales or income, risk, investment options, financial variables Consumer Price Index (IPC), Fixed-term deposit (DTF), Market Representative Rate (TRM), cash opportunity cost, time value of money, profit indicators Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) and sensitivity analysis of the different hypotheses.

For the 3 options, the initial investment in infrastructure and inputs necessary for CNT production were determined; likewise, monthly expenses for CNT production were estimated. With these input parameters, many different cash flows were established for each option. For each of the three, the sale price (\$/gr) or percentage sold monthly (%/g) was varied, which entailed observing the behavior of the investment's amortization over time. It is worth noting that for all cases, monthly debt amortization was set at 60% of the free cash flow.

Taking debt amortization into account for the free cash flow, the NPV and IRR were calculated for each option, along with concomitant variations in sales price (\$/gr) and percentage sold monthly (%/gr).

4. Results and Analysis.

4.1 Break-Even Point.

The break-even point for debt repayment is an important index for establishing when the business will begin producing real profits. For this purpose, sensitivity analyses are performed; these analyses involve scenarios in which different models are created with varying sales price (per gram for the present case) and the percentage of actual sales. For Options 1 and 2, when the sales price/gram was varied, actual sales were kept constant at 70%. Conversely, when actual sales were varied, price/gram was kept constant at \$10,000COP/g. For Option 3, when the percentage of actual sales was varied, the sale price was kept constant at \$5,000COP/g (in contrast to Options 1 and 2).

For Option 1, the price/gram was varied between \$5,500 and \$10,000 COP and the percentage of sales between 40% and 70%. For Option 2, the price/gram was varied between 4,400 and 10,000 COP and the percentage of actual sales between 31% and 70%. For Option 3, the price/gram was varied between 3,500 and 5,000 COP and the percentage of actual sales between 48% and 70%.

Higher prices/gram and higher percentages of actual sales meant real profits could be achieved within a shorter period. That is not to imply that this analysis only discovered one path to profits, but rather to offer a panorama of the business model and market to the investor.

4.2 Sensitivity Analysis (IRR and NPV).

IRR was compared to the average rate offered by a safe investment with 7.06% Effective Rate, thereby answering the question of at what price/gram and actual sales percentage would profit surpass the 7.06% Effective Rate. NPV was only studied to determine what price/gram and actual sales percentage were needed to ensure a positive NPV, and thus lead to profit.

For Option 1, at 5,900 COP/gram and an actual sales percentage greater than 41%, the venture became profitable. For Option 2, at sales 4,550 COP/gram and an actual sales percentage of 31.5%, the venture became profitable. For Option 3, at 3,550 COP/gram and an actual sales percentage of 49.5%, the venture became profitable. Across all analyses, higher sales volumes and higher sales price per gram improved the likelihood of profits and feasibility. See Figures 4-7 for more information.

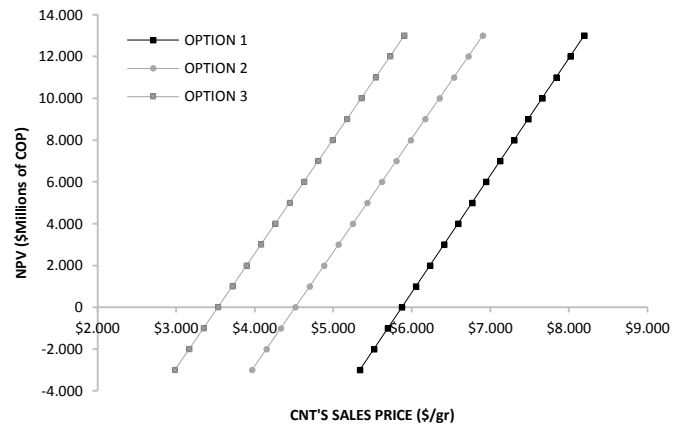


Figure 5: NPV Variation (\$) vs Sales Price (\$/gr).

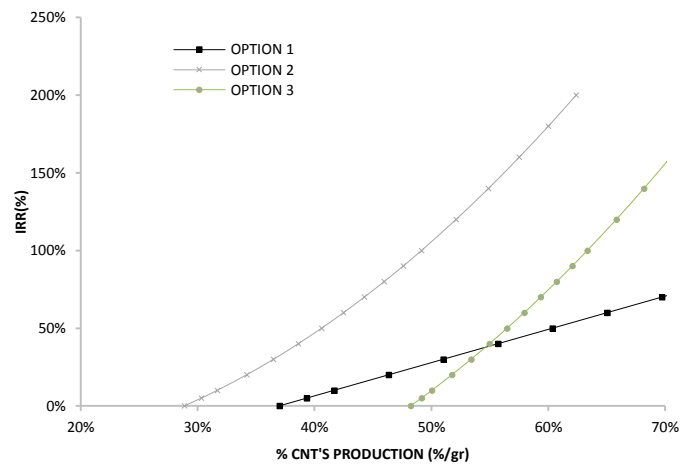


Figure 6: IRR Variation (%) vs % Actual Sales (%/gr). % Of minimum sales of the product to find the equilibrium point with 7.06%, from their profits are obtained.

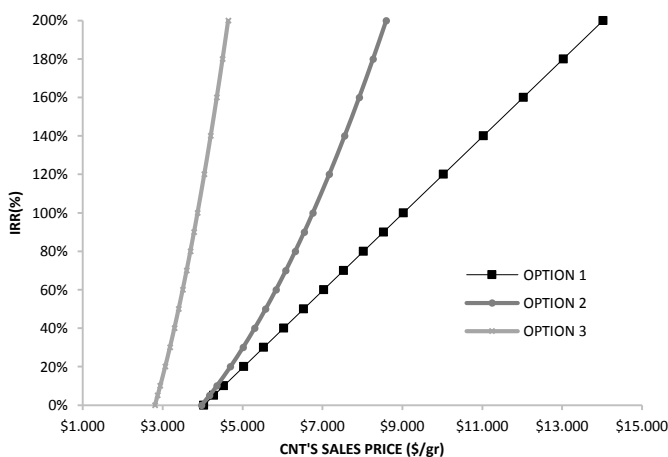


Figure 4: IRR Variation (%) vs Sales Price (\$/gr). The value is displayed at each equilibrium point.

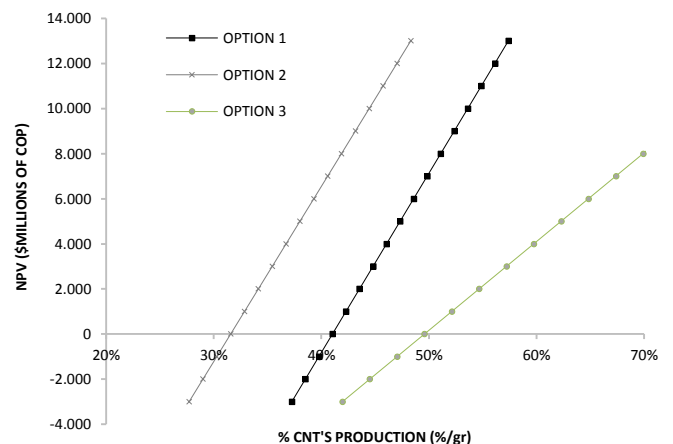


Figure 7: NPV Variation (\$) vs % Actual Sales (%/gr). Variation of the profit in millions (COP), with reference to the percentage of sales of the production.



5. Conclusions and Recommendations.

This article established the feasibility of industrial-scale CNT production in Bogota and its suburban areas. CNT modified asphalt improves the response to fatigue by 22% over conventional and a 34% increase in dynamic modulus. Which in a mechanic design of pavement doubles the useful life of the structure of pavement. The product would be used as an additive for special cases, i.e. materials such as cement and asphalt mixes in specific building projects for which large quantities of nano-material is not required (but which would benefit from the use of CNT additives). In the case of rutting in stop areas, testing the efficiency and effectiveness of CNT as an additive in asphalt mixes would be useful for determining if CNT represents a long-term profitable investment, especially relative to maintenance and repair costs.

The economic impact of using CNT at 2% of asphalt weight in a m3 of MDC-2 mixture proved expensive when compared to other additives on the market. However, CNT strengthens many properties and thus ensures a comprehensive improvement of material quality. Therefore, CNT is rightly framed as an attractive solution to service life issues when compared to conventional additives, notably because the latter do not provide a comprehensive solution to the problem of improving material characteristics.

The economic impact of using CNT at 0.0115% of cement weight in mortars was not as high as asphalt. CNT affords possible reductions in material quantities when constructing buildings because of their enhancement of a material's mechanical properties. This implies that CNT is an attractive additive for cement producers. CNT might even prove more attractive to cement producers than to Ecopetrol. In this case, CNT could occupy an important niche in the market.

Using the GIS tool to overlay a few parameters (geographic, financial and strategic), a favorable location for the CNT was ascertained. Of the possible options, the location identified as most favorable was in Fontibón (Bogotá D.C), as can be seen in the proposed plans included in this document. Building here would minimize investment in transportation of monthly inputs, industrial property taxes, and public utilities costs; moreover, it would obviate the construction of access roads to the plant or any other type of infrastructure.

For each of the three options, the buildings internal layout in 3D were designed with AUTODESK REVIT® software, thus achieving a high-level of detail for possible feasibility and plant construction. Furthermore, this software was used to calculate the amount of

material later evaluated in CAPEX for each option. Such distribution-related details will save time for any future feasibility and construction studies.

The CAPEX and OPEX cost analysis for the three options determined the third option to be best, given that it would require less investment than the other two options, thereby entailing less risk for business rollout. Regardless, all three options could be feasible.

In the break-even point analysis for debt repayment, there was no single best answer, for all three options were feasible. The selection criteria were based on variations of the interest rate on the loan, the debt's amortization period and the unit sale price of the CNT. This analysis allows investors to see a breakdown of when they will recoup their investment given certain parameter variations.

Similarly, sensitivity analysis did not provide a single "definitive" option. All options proved feasible. Selection criteria included IRR and NPV. For each option, IRR varied in relation to the amount invested, operating costs and monthly cash flow. Under these budgets, the limit values at which profitability would be achieved for the options were as follows. For Option 1, at 5,900 COP/gram and an actual sales percentage greater than 41%, the venture became profitable. For Option 2, at sales 4,550 COP/gram and an actual sales percentage of 31.5%, the venture became profitable. For Option 3, at 3,550 COP/gr and an actual sales percentage of 49.5%, the venture became profitable. Based on this analysis, it is possible to determine the sales price per gram and quantity that must be sold for each option in accordance with the objectives of the investors.

6. Referencias.

- [1] Abu Al-Rub, R. K., Ashour, A. I., & Tyson, B. M. (2012). On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 35, 647-655. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.086
- [2] Beltrán, P., & Sánchez, A. (2015). Evaluación del efecto de los nanocompuestos de carbono en la adhesión y cohesión de un ligante asfáltico (60/70). (Master's thesis).
- [3] British Petroleum (BP), (2013). C., *Static Review of World Energy – June 2013*. Pp 1 – 44, June 2013.
- [4] Collins, P. G., & Avouris, P. (2000). Nanotubes for electronics. *Scientific American*, 283(6), 62-69.



- [5] Covarrubias, C., Farías, L., Pérez, N., & Hernández, E. (2013). Nanocompuestos a base de polímeros dispersos y nanofibras de carbono. *Revista Iberoamérica De Polímero*, 14, 108-116.
- [6] Gallego, J., Sierra, G., Mondragon, F., Barrault, J., & Batiot-Dupeyrat, C. (2011). Synthesis of MWCNTs and hydrogen from ethanol catalytic decomposition over a Ni/La₂O₃ catalyst produced by the reduction of LaNiO₃. *Applied Catalysis A: General*, 397(1), 73-81.
- [7] Jiménez, G. (2012). Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica mdc-2 con nanotubos de carbono obtenidos a partir de metano vía catalítica. (Master's thesis).
- [8] Jiménez, G. A., Reyes, F., & Daza, C. (2012). mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla asfáltica mdc-2 con nanotubos de carbono obtenidos a partir de metano vía catalítica. Maestría en Ingeniería Civil, PUJ Bogotá.
- [9] Makar, J. M., & Beaudoin, J. J. (2004). Carbon nanotubes and their application in the construction industry. *Special Publication-Royal Society Of Chemistry*, 292, 331-342.
- [10] Mármol, P.C.; (2010). Hormigones con fibras de acero – características mecánicas, Tesis (Máster en Ingeniería de Estructuras Cimentaciones y Materiales. Universidad Politécnica de Madrid.
- [11] Mendoza, O., Sierra, G., Tobón, J. I. (2013). Efecto híbrido de los nanotubos de carbono y la nano sílice sobre las propiedades mineralógicas y mecánicas de morteros de cemento pórtland.
- [12] Remón, R. (2015). Nano materiales para el hormigón. Trabajo de hormigones especiales en MIH.
- [13] Reyes, O.J., Reyes, F.A., (2005). Incidencia en las propiedades del asfalto y de una mezcla asfáltica MDC-1 al adicionar SBR. XV Simposio de Ingeniería de Pavimentos. s.d.: Melgar.
- [14] Rossetter Carbon Nanomaterials Business Holdings Ltd. (2010). Price list and order form. Recovered from: <http://www.azonano.com/suppliers.aspx?SupplierID=1098>
- [15] Rubio, M., & Martínez, D. (2014). Nanotubos de carbono para el mejoramiento de la mezcla asfáltica MDC-2 y del asfalto colombiano 60/70. (Master's thesis)
- [16] Rubio, M., Martínez, D., Reyes, F. (2017). Mechanical Performance of HMA-2 Modified with Purified and Unpurified Carbon Nanotubes and Nanofibers. *Ingeniería e Investigación* 37. DOI: 10.15446/ing.investig
- [17] Santagata E, Baglieri O, Tsantilis L, Dalmazzo D (2012). Rheological Characterization of Bituminous Binders Modified with Carbon Nanotubes, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
- [18] Shah, S. P., Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Mondal, P. (2009). Nanoscale modification of cementitious materials. *Nanotechnology in construction* 3, 125-130.
- [19] Sibal, A., Das, A., & Pandey, B. B. (2000). Flexural fatigue characteristics of asphalt concrete with crumb rubber. *International Journal of Pavement Engineering*, 1(2), 119-132.
- [20] Swan (2007). Liberating the Nanotube: From Lab to Large Scale Production. Russell Clarke – Carbon Nanomaterials Business Manager Thomas Swan & Co. Ltd.
- [21] Wang, N., Pandit, S., Ye, L., Edwards, M., Mokkalpati, V. R. S. S., Murugesan, M., Liu, J. (2017). Efficient surface modification of carbon nanotubes for fabricating high performance CNT based hybrid nanostructures. *Carbon*, 111, 402-410. doi:10.1016/j.carbon.2016.10.027



Envío de artículos

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

Formato de los artículos

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

Primera Página

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

Resumen, abstract y palabras claves

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

Contenido del artículo

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

Referencias

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

Tablas y fórmulas

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

Figuras

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



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



rioc.cl