

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE	GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS
VOCALES	LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY ARMANDO PALOMINO INFANTE RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS JAIRO URIBE ESCAMILLA JUAN MANUEL LUNA GORDILLO (Representante de los profesores) SERGIO CAMILO DÍAZ FUENTES (Representante de los estudiantes)
RECTOR	ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ
SECRETARIO	RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR	JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
COMITÉ EDITORIAL	GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS CLAUDIA RÍOS REYES PAULA XIMENA RÍOS REYES HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ RICARDO SALAZAR FERRO GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
DIRECCIÓN EDITORIAL	CRISTINA SALAZAR PERDOMO
EDICIÓN	DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA CORRECCIÓN DE ESTILO ELKIN RIVERA GÓMEZ
DIRECCIÓN COMERCIAL	EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 N.º 205-59
TEL.: (091) 668 3600, EXTS. 394 Y 397
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

Contenido

5 / EDITORIAL

Germán Acero Riveros

7-18

Desarrollo de un sistema streaming de audio orientado a dispositivos móviles

Luz Carolina Jaimes Contreras, Yessika Liliana Plata Jaimes, Irene Lizeth Manotas Gutiérrez y Henry Argüello Fuentes

En el presente artículo se describen el desarrollo y la implementación de un prototipo *software* de *streaming* de audio para utilizarlo en dispositivos celulares. El sistema desarrollado se puede operar sobre redes de servicio general de paquetes vía radio (GPRS), de tercera generación (3G), o utilizando una conexión inalámbrica. Se describe además el diseño de una aplicación para un dispositivo móvil celular desarrollada sobre el lenguaje Java (versión J2ME), empleando la librería LWUIT para el desarrollo de la interfaz gráfica.

19-26

Tomografía sísmica a partir de registros de SPT

Jorge Alberto Rodríguez

En este artículo se explora la posibilidad de determinar perfiles de suelos utilizando tomografía sísmica mediante la medición de tiempos de arribo en superficie de ondas producidas en profundidad en el terreno, en la medida en que se hace el ensayo de penetración estándar. El ensayo realizado consistió en el registro de los golpes generados por el SPT mediante doce geófonos colocados en superficie, a una separación de 4 m entre ellos a lado y lado del sitio de la perforación y medidos con un sismógrafo de refracción.

27-34

Evaluación del desempeño de una pista de prueba a escala real, utilizando mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho proveniente de llantas recicladas y otros modificadores

Gilberto Martínez Argüelles, Libardo Alfonso Celis Yaruro, Juan Pablo Nieto Mora, Óscar Mauricio Velásquez Bobadilla y David González Herrera

En este artículo se presenta el desempeño de un tramo de prueba a escala real construido con el fin de verificar el desempeño de mezclas asfálticas fabricadas con asfalto modificado, proveniente de desechos de llantas en Colombia. El tramo está compuesto por cinco secciones: dos secciones en las cuales se aplican mezclas con asfalto modificado por vía húmeda y por vía seca, respectivamente; un tramo con mezcla asfáltica con asfalto convencional, y dos secciones con asfalto modificado con polímeros SBR y SBS.

Contenido

35-42

Coliseo El Otoño: una propuesta arquitectónica a partir de la “divina proporción”

Alfonso Rodríguez Díaz, Stefano Anzellini y María Inés García-Reyes

En este artículo se presentan los aspectos arquitectónicos más relevantes de la obra –que ha incorporado en su diseño conceptos como la proporción áurea–, en los que se ha hecho una investigación sobre la expresión estructural en la arquitectura en obras realizadas por grandes maestros que han trascendido por la utilización de la tecnología, los materiales, los edificios adaptables y la hechura de enormes cubiertas ligeras.

43-49

Obtención de un recubrimiento de cobre sobre un acero de bajo carbono a partir de un desecho industrial

*William Aperador Chaparro, Aura Sofía Mejía Morales
y Diego Fernando Martínez Ramírez*

El cobre se emplea ampliamente en la industria por sus buenas propiedades mecánicas, alta conductividad eléctrica y térmica, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. Sin embargo, durante las operaciones de procesamiento y fabricación del metal se utiliza un método de limpieza conocido como decapado ácido, el cual es responsable de causar pérdida de material por efectos de la corrosión.

51-57

TECNOLOGÍA

La bilastra estructural (muro bilastra)

Fabián Andre Sánchez Bonilla

59 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

GERMÁN ACERO RIVEROS

Presidente del Consejo Directivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

german.acero@escuelaing.edu.co

Los problemas de pérdidas de vidas o pérdidas materiales que se presentan en el país por diferentes situaciones asociadas con los excesos de precipitación no son nada nuevo ni mucho menos de propiedad exclusiva de los colombianos. Eso sí, una simple mirada a los archivos de la prensa, de cualquier época, nos permite ver que siempre ha sido un tema de moda, y lo será por mucho tiempo.

Cada año, la temporada invernal o incluso tormentas aisladas traen consigo las correspondientes catástrofes, que ponen en evidencia las condiciones de indefensión en que viven muchos de nuestros semejantes, como resultado de innumerables causas de índole económica y social, pero también, con frecuencia, relacionadas con aspectos culturales y hasta de actitud. Estas condiciones, que se repiten invierno tras invierno, son la materia prima de los medios para atiborrar diariamente a la otra parte de la población, también indefensa ante las avalanchas de malas noticias, aprovechadas por personajes, políticos o no, que ven con una claridad absoluta la solución de cada uno de los problemas hasta cuando se les otorga el poder y los medios para resolverlos.

Sin embargo, la crisis a la que nos ha llevado el invierno del último año ha logrado socavar las bases de la sociedad colombiana, pues afectó a estratos que tradicionalmente sólo veían por televisión el infortunio de otros. Y han sobrado entonces culpables a todo nivel, con lo que quedan en evidencia los problemas de falta de planeación del desarrollo, incapacidad de gestión y carencia de recursos técnicos por parte de algunas corporaciones autónomas

regionales y del Estado en general. Como es natural, han quedado al descubierto nuestros reiterados problemas de corrupción y, entre otros aspectos, se ha demostrado la poca o nula participación de las universidades en la solución de nuestros problemas cotidianos.

Con todo, quizá lo más preocupante es que no hay pronunciamientos ni propuestas importantes por parte de sectores influyentes de la sociedad civil o de partidos políticos, y tampoco se ha escuchado a los voceros de las agremiaciones de ingenieros o de agricultores y ganaderos directamente afectados por el problema, ni mucho menos se han planteado soluciones analizadas en debida forma por parte de los encargados de administrar no sólo los dineros sino los recursos naturales de los colombianos.

No es fácil resolver estos problemas, pero es evidente que se necesita avanzar en los procesos de planeación del desarrollo y del aprovechamiento y control de los recursos hidráulicos, al igual que resulta imprescindible incrementar la agilidad y el talento en la gestión, así como la capacidad técnica en las entidades del Estado encargadas de administrar los recursos naturales, lo cual es impensable sin el concurso de las universidades y de expertos en esta temática que, con seguridad, los tenemos en el país.

No obstante, la solución tiene que comenzar por controlar las graves dificultades relacionadas con la corrupción, por un lado, y aquellas originadas en la politización de algunos organismos del Estado, cuya dirección, administración y operación deben estar en manos de personal técnico de las más altas calidades.

Este año hemos tenido que escuchar a funcionarios escondiendo la realidad, que salta a la vista, detrás de argumentos tales como la furia de la naturaleza que nos ha enviado lluvias de muy baja frecuencia, nunca antes vistas por las actuales generaciones, y aunque algo de verdad puede haber, no debemos quedarnos entonces con la sensación de que el próximo verano no sólo evaporará las aguas de la inundación sino también las imágenes de los damnificados, porque a pesar de las dificultades técnicas y económicas es posible avanzar en la solución de nuestros problemas. La prueba es que uno de los eventos de más baja frecuencia que he observado en el último año, a pesar

del crudo invierno, es la ausencia de inundaciones en la parte baja del río Tunjuelo.

Tal vez el mantenimiento de las obras hidráulicas existentes y la adecuada operación de su sistema de embalses han permitido el paso de crecientes otrora impensables, sin efectos desastrosos para la comunidad. Esa sí es una novedad: van dos periodos de invierno sin que el Tunjuelo sea noticia. ¿Será cuestión de suerte o es que quizá sí podemos hacer mejor las cosas?

Desarrollo de un sistema *streaming* de audio orientado a dispositivos móviles

Developing an audio *streaming* system for mobile devices

LUZ CAROLINA JAIMES CONTRERAS¹, YESSIKA LILIANA PLATA JAIMES², IRENE LIZETH MANOTAS GUTIÉRREZ³, HENRY ARGÜELLO FUENTES⁴

1. Ingeniería de Sistemas. Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB) de la Universidad Industrial de Santander. luzkjaimes@gmail.com.

2. Ingeniería de Sistemas. Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB) de la Universidad Industrial de Santander. yessikaliliana@gmail.com.

3. Ingeniería de Sistemas. Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB) de la Universidad Industrial de Santander. irenelizeth@gmail.com.

4. Profesor titular de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander. henarfu@uis.edu.co.

Recibido: 10/09/2010 Aceptado: 26/10/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En el presente artículo se describen el desarrollo y la implementación de un prototipo *software* de *streaming* de audio para utilizarlo en dispositivos celulares. El sistema desarrollado se puede operar sobre redes de servicio general de paquetes vía radio (GPRS), de tercera generación (3G), o utilizando una conexión inalámbrica. Se describe el diseño de una aplicación para un dispositivo móvil celular desarrollada sobre el lenguaje Java (versión J2ME), utilizando la librería LWUIT para el desarrollo de la interfaz gráfica. Adicionalmente, se describe el proceso usado para analizar y enviar los datos de los archivos de audio desde un servidor de *streaming* (*Darwin Streaming Server*) hacia los dispositivos móviles celulares, así como también la característica de implementación de los protocolos de *streaming* (RTSP y RTP) para un dispositivo móvil celular utilizando la tecnología Java.

Palabras claves: *streaming* de audio, dispositivos móviles, RTSP, RTP, J2ME.

Abstract

This paper describes the development and implementation of prototype software for an audio streaming system for mobile devices. The development system can be operated on networks via General Packet Radio (GPR), third generation (3G), or using a wireless connection. We describe the design and application development for mobile devices built on the Java language (J2ME version) using the LWUIT library for GUI development. Additionally, we describe the process used to analyze data and send audio files from a streaming server (*Darwin Streaming Server*) to the mobile phones, putting special emphasis on the challenges from implementing the streaming protocols (RTSP and RTP) in a mobile phone using Java technology.

Keywords: mobile streaming, RTSP, RTP, AMR, J2ME.

INTRODUCCIÓN

La evolutiva y amplia capacidad multimedia de los dispositivos móviles celulares y de las redes que los intercomunican ha impulsado el estudio de técnicas de entrega y distribución de contenidos multimedia. La técnica denominada *streaming* de multimedia se utiliza para transmitir información por la red, de tal manera que su emisión desde el servidor, su comunicación por la red, la descarga y el procesamiento en el cliente se producen “simultáneamente”, sin necesidad de guardarlos en la memoria del cliente. Para hacer posible la transferencia de archivos multimedia vía *streaming* se requiere, además de la implantación de un servidor de *streaming*, el uso de estándares y protocolos propios de esta tecnología.

Los tres protocolos básicos necesarios para implementar un servicio de *streaming* son el Protocolo de Streaming de Tiempo Real [1] –*Real Time Streaming Protocol*– (RTSP), el Protocolo de Transporte de Tiempo Real [2] –*Real Time Transport Protocol*– (RTP) y el Protocolo de Descripción de Sesión [3] –*Session Description Protocol*– (SDP). El protocolo RTSP se utiliza para el establecimiento, gestión de sesión y comunicación con el servidor por parte del cliente; el protocolo RTP es el responsable del transporte de los datos multimedia, mientras que el protocolo SDP se encarga de la descripción general de la sesión establecida entre el cliente y el servidor de *streaming*. Además de la implementación correcta de los protocolos RTSP, RTP y SDP para la transmisión de datos entre cliente y servidor, otro elemento importante es el uso de un códec que permita que la secuencia de contenido multimedia digital se comprima, con el fin de reducir el tamaño en bits y lograr un menor consumo de ancho de banda durante el proceso de transmisión [4].

En este artículo se expone un prototipo *software* de un sistema de *streaming* de audio para dispositivos móviles celulares utilizando el servidor de *streaming* Darwin –*Darwin Streaming Server*– (DSS), el cual es un servidor especial que permite enviar flujos multimedia a través del estándar de protocolos RTSP y RTP. El artículo se encuentra dividido en seis partes. En la segunda parte se registra un breve estado del arte acerca del tema. En la tercera parte se presenta la arquitectura del sistema desarrollado y sus componentes principales. En la cuarta parte se hace una descripción del proceso de desarrollo de la aplicación para el dispositivo móvil celular denominada STREAMJASSMOBILE. En la quinta y sexta

partes se muestran los resultados del proceso de transmisión de contenido, la aplicación *software* desarrollada y las conclusiones, respectivamente.

ESTADO DEL ARTE

La exploración de la técnica de *streaming* de audio sobre dispositivos móviles celulares ha sido de gran interés en los procesos de investigación en grandes empresas, como Pandora [5] y Netflix [6] en Estados Unidos, al igual que para universidades nacionales e internacionales. Un claro ejemplo de este interés es el desarrollo de dos proyectos relacionados con dicha temática. En el primero, un proyecto de maestría en la Universidad Umea, en Suecia [7], se implementaron sobre JME los protocolos RTP y RTSP para el manejo del flujo de audio en una transmisión de *streaming*; en el segundo proyecto, realizado por alumnos de pregrado de la Universidad El Bosque [8], se hizo un estudio general de todo el proceso de *streaming* sobre dispositivos móviles celulares a través del protocolo HTTP. Sin embargo, estos dos proyectos presentan inconvenientes: en [8] se trata de implementar la técnica de *streaming* con el protocolo HTTP, es decir, no se aplican los protocolos propios de *streaming* como RTP y RTSP; en vez de esto se trata de simular la técnica con otro protocolo que no cumple con las características de *streaming* debido a que con esta solución se debe transmitir y descargar todo el archivo de audio para ser escuchado. Por otro lado, en [7] se implementan los protocolos RTP y RTSP, pero no se muestra el diseño utilizado para la aplicación de la solución sobre dispositivos móviles celulares.

Teniendo en cuenta las soluciones presentes y los proyectos de investigación desarrollados en el área, se efectuaron la investigación, diseño e implementación del prototipo de *streaming* STREAMJASSMOBILE descrito en este artículo, el cual proporciona una solución de *streaming* de audio orientada a dispositivos móviles celulares utilizando los protocolos RTP y RTSP.

ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El sistema de *streaming* desarrollado está basado en la arquitectura cliente/servidor utilizando el modelo de dos capas: *Front/End* y *Back/End* [9]. En la primera capa (*Front/End*), el usuario interactúa con la aplicación móvil desarrollada. La segunda capa (*Back/End*) consiste

en la comunicación con el servidor web para el acceso a la información contenida en la base de datos, y la comunicación y transferencia de los archivos de audio alojados en el servidor de *streaming*.

Cuando un dispositivo celular, cliente en el sistema, desea descargar un contenido multimedia (en este caso un archivo de audio) desde el servidor de *streaming* a través de la aplicación J2ME, debe conectarse a internet a través de una red celular (3G o GPRS) o por medio de una conexión inalámbrica (WLAN). A continuación se ilustra la arquitectura de red del sistema (figura 1).

El procedimiento de solicitud de un contenido multimedia está conformado por cuatro pasos, los cuales se describen a continuación:

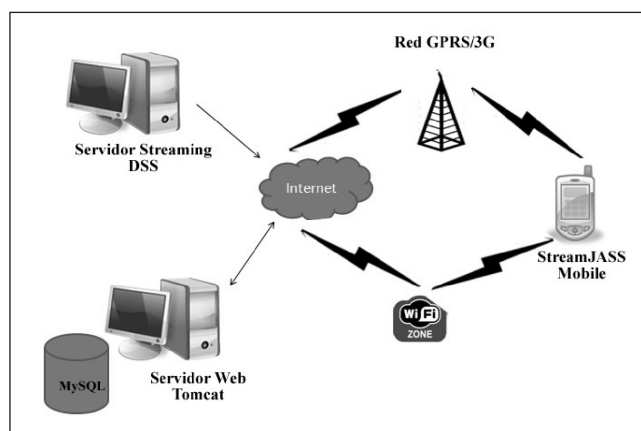


Figura 1. Arquitectura de red del sistema.

1. La aplicación cliente se conecta primero al servidor web y accede a la base de datos para obtener información del archivo de audio solicitado y la ubicación de éste en el servidor de *streaming*.
2. Una vez conocida la ubicación del archivo, se procede a establecer la comunicación con el servidor de *streaming*. Esta comunicación se hace a través de los métodos que provee el protocolo de comunicación RTSP.
3. Si la comunicación es exitosa, el servidor empieza a enviar datos del archivo de audio solicitado en forma de paquetes por la red hacia el cliente, es decir, el

dispositivo móvil celular. Estos paquetes se envían haciendo uso del protocolo de transporte RTP.

4. Una vez recibidos los paquetes del archivo de audio, la aplicación cliente se encarga de desempaquetarlos y decodificarlos para iniciar su reproducción.

Seguidamente se describen las partes del sistema involucradas en el proceso de solicitud del archivo. Estas partes componen la capa *Back/End*, e involucran los dos servidores implantados y el formato de codificación que se escogió para comprimir los datos de los archivos de audio.

Servidor web

El servidor web se utiliza dentro del sistema de *streaming* para alojar un *servlet*¹, encargado de la comunicación y adquisición de la información contenida en la base de datos. Más adelante se muestra el diagrama de despliegue de la aplicación móvil denominada STREAMJASSMOBILE y se puede ver la relación entre la aplicación y el servidor web (figura 2).

La aplicación STREAMJASSMOBILE utiliza conexiones HTTP para establecer una comunicación con el *servlet*, que finalmente accederá a la base de datos para obtener la información del archivo de interés. En la base de datos está contenida la información detallada de cada archivo de audio: nombre, autor, género, URL² de la imagen asociada, URL donde se encuentra físicamente el archivo de audio en el servidor de *streaming*, entre otros datos. Para el servidor web se utilizó el Tomcat en su versión 6.0 [10] y como sistema gestor de base de datos MySQL 5.0 [11].

1. Objeto que se ejecuta en un servidor o contenedor JEE y sirve para generar contenido dinámico desde un servidor web. Mayor información disponible en <http://www.oracle.com/technetwork/java/index-jsp-135475.html>.
2. URL es la sigla de localizador de recurso uniforme (en inglés, *Uniform Resource Locator*), la dirección global de documentos y de otros recursos en la web.

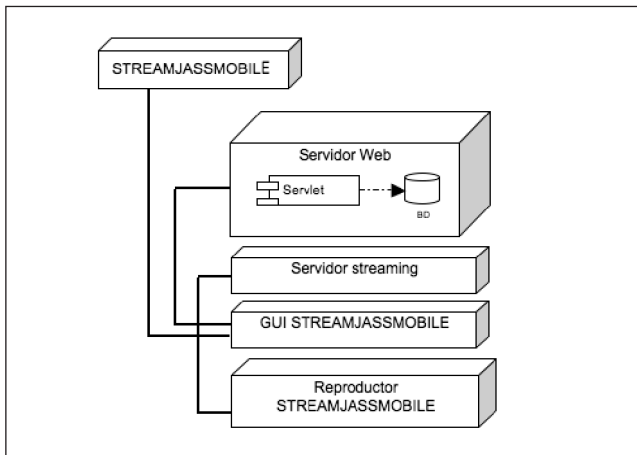


Figura 2. Diagrama de despliegue de la aplicación STREAMJASSMOBILE.

Codificación de audio AMR

La transferencia de audio digital requiere que los datos estén codificados para evitar consumos excesivos de ancho de banda [1]. Dentro del sistema de *streaming* desarrollado, el códec utilizado para comprimir los datos de los archivos de audio es el denominado *Adaptive Multi-Rate* (AMR). Este códec permite una mejor tasa de compresión frente a otros formatos, como MP3 o WAV, y con una pérdida de calidad menor. Además, este códec fue escogido por la Third Generation Partnership Project (3GPP) como el códec obligatorio para los sistemas celulares de tercera generación [12]. A renglón seguido se muestra una comparación de tamaños entre diferentes formatos de codificación para un mismo archivo de audio (figura 3).

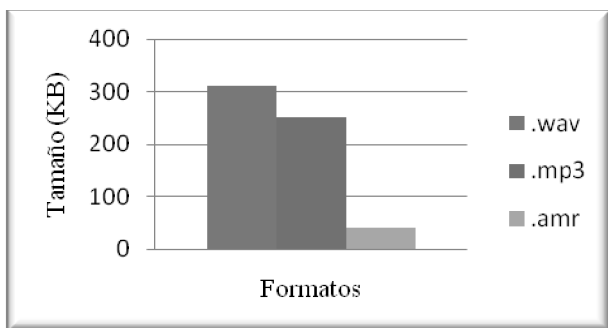


Figura 3. Diferencia de tamaño entre archivos de audio WAV, MP3 y AMR.

El formato de audio AMR está conformado por ocho tipos de codificadores fuente, los cuales usan diferentes tasas de bits que oscilan entre los 4,75 y 12,2 Kbps³.

La estructura de un archivo de audio codificado con el códec AMR está compuesta por una cabecera principal de 6 *bytes*, seguido de un número determinado de marcos (*frames*), cada uno con su respectiva cabecera. La cabecera de cada marco es de 1 *byte* y el tamaño total del marco depende de la velocidad a la que se codificó. A continuación se presenta la estructura de un archivo AMR (figura 4).

Cabecera del archivo (#!AMR(n))
Cabecera Marco 1
Marco 1
Cabecera Marco 2
Marco 2
Cabecera Marco 3
Marco 3
...
Cabecera Marco N
Marco N

Figura 4. Estructura de un archivo codificado con el formato AMR.

Servidor de streaming

La elección de un servidor de *streaming* debe estar marcada por una serie de criterios técnicos que satisfagan los requerimientos del sistema. En este caso, se tuvieron en cuenta seis criterios: usabilidad, soporte de transmisiones Unicast, soporte de formatos de audio, documentación y licencias. De acuerdo con lo anterior, el servidor seleccionado fue el *Darwin Streaming Server* (DSS), versión 5.5 [13].

El DSS puede administrarse desde una interfaz de usuario web local o remotamente, con la cual se pueden realizar cambios en las configuraciones generales del servidor, crear listas de reproducción, ver estadísticas de los archivos solicitados y monitorear los usuarios conectados al servidor.

3. Mayor información sobre la codificación AMR se puede consultar en el siguiente enlace: http://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_multi-rate_compression.

El DSS emplea el protocolo RTSP para la comunicación con el cliente. Para que este último pueda establecer una sesión con el servidor, es necesario utilizar los métodos o funciones que provee el protocolo RTSP. Estos métodos se describen a continuación:

- *Describe*. Fase inicial en la comunicación, en la que se obtiene la descripción del archivo solicitado. Es un método obligatorio debido a que los métodos subsiguientes dependen de él.
- *Setup*. Este método cumple la función de hacer que el servidor reserve los recursos necesarios para comenzar la transmisión del flujo de datos. Además, indica el protocolo que hay que utilizar para esta transferencia (UDP, TCP o HTTP).
- *Play*. Informa al servidor que puede iniciar el envío de flujos de datos establecidos. Para realizar una solicitud de *Play* el cliente debe hacer primero una solicitud *Setup*.
- *Pause*. Este método interrumpe temporalmente el envío de datos por parte del servidor, pero no libera los recursos reservados para dicha sesión.
- *Teardown*. Método utilizado para detener la transmisión de un recurso determinado. Cuando se hace un llamado a este método se liberan todos los recursos relativos a dicha comunicación, invalidando cualquier petición realizada sobre dicha sesión.

Una vez efectuadas las operaciones de los métodos *Describe* y *Setup*, el método *Play* puede ejecutarse para hacer que el servidor inicie el flujo de datos hacia el cliente. El servidor DSS utiliza como protocolo de transporte de datos el protocolo RTP, de manera que los datos se encapsulan en paquetes RTP. A continuación se muestra la estructura de un paquete RTP enviado por el servidor de *streaming* (figura 5).

Byte 0		Byte 1		Byte 2		Byte 3
V	P	X	CC	M	PT	Número de secuencia
Marca de tiempo						
Fuente de sincronización (SSRC)						
Carga útil						

V= Versión del protocolo RTP (versión 2)

P= Relleno (*padding*)

X= Extensión

CC= Contador CRS

M= Marcador

PT= Tipo de carga útil.

Figura 5. Estructura de un paquete RTP en el servidor DSS.

Los archivos que se van a transmitir por el servidor de *streaming* se ubican en una carpeta específica, creada durante la instalación y configuración del DSS. Sin embargo, antes de cargar los archivos al servidor, éstos deben pasar por un proceso llamado especificación o *hinting*. Este proceso hace que el archivo se subdivide en pistas (*tracks*), las cuales se envían por el servidor en paquetes RTP, como se mencionó anteriormente. En síntesis, el proceso de especificación ofrece información al servidor de cómo enviar partes del archivo hacia el cliente, indicando la longitud máxima en *bytes* y los milisegundos de audio de cada paquete que se va a transmitir.

APLICACIÓN STREAMJASSMOBILE

La aplicación *software* STREAMJASSMOBILE es la aplicación cliente en el sistema, la cual se encuentra en la parte *Front/End* de la arquitectura. Esta aplicación se desarrolló en el lenguaje Java, utilizando la versión para dispositivos de capacidades reducidas, Java Micro Edition (JME), y una API adicional (LWUIT) para desarrollar interfaces gráficas de usuario de dispositivos móviles.

Como se indicó anteriormente, el servidor DSS realiza la comunicación con el cliente mediante el protocolo RTSP y los métodos que éste provee; no obstante, el lenguaje Java en su versión JME no tiene soporte para el manejo de este protocolo, por lo cual se decidió implementar los métodos *Describe*, *Setup*, *Play*, *Pause* y *Teardown*, en el lado del cliente, para el establecimiento y manejo de una sesión RTSP con el servidor DSS.

Interfaz gráfica de usuario - LWUIT

Para el desarrollo e implementación de aplicaciones orientadas a dispositivos móviles celulares, el lenguaje JME y el ambiente de ejecución MIDP⁴ proporcionan los componentes básicos necesarios para estos procesos. Sin embargo, las interfaces gráficas de usuario (IGU), desarrolladas con las API proporcionadas por la especificación JME, son poco atractivas a la vista del

4. MIDP es la sigla de *Mobile Information Device Profile* y es el perfil utilizado para el desarrollo de aplicaciones móviles celulares.

usuario final debido a que éstas ofrecen componentes básicos sin animaciones y que pueden variar en ubicación y visualización cuando la aplicación se ejecuta en dispositivos celulares de diferente referencia o marca; en otras palabras, la IGU no permanece igual si la aplicación se ejecuta en varios dispositivos móviles celulares diferentes. No obstante, existen librerías adicionales, como la denominada LWUIT (*Lightweight UI Toolkit for Java ME*) [14], la cual permite mejorar el aspecto y usabilidad de la IGU en las aplicaciones JME y, por tanto, en aplicaciones orientadas a dispositivos móviles celulares que soporten la tecnología Java.

La aplicación STREAMJASSMOBILE usa la librería LWUIT. La utilización de esta librería hace que la aplicación sea más agradable y con mayor usabilidad debido a los elementos gráficos que se emplean para crear la IGU. Además, con la utilización de esta librería la IGU de la aplicación se adapta fácilmente a las particularidades de cada dispositivo móvil celular sin cambiar la localización y visualización de los elementos gráficos, lo que permite que la aplicación desarrollada se vea y ejecute del mismo modo en cualquier dispositivo móvil celular donde se instale. Adicionalmente, esta librería permite integrar diferentes tipos y colores de fuentes, imágenes y fondos atractivos que no habrían sido posibles con las API de MIDP.

Implementación del protocolo RTSP

En la implementación de los métodos del protocolo RTSP, uno de los procedimientos es la conexión del cliente con el servidor de *streaming*, lo cual se logra a través de la creación de un *socket*⁵. Una vez establecida esta conexión, se construyen los mensajes RTSP para la interacción entre cliente-servidor. Los mensajes RTSP son construidos como cadenas de texto y enviados al servidor como cadenas de *bytes*. El servidor, por su parte, envía su respuesta en una cadena de *bytes* que el cliente convierte en cadenas de texto para su interpretación.

El primer mensaje construido y enviado al servidor se realiza a través del método *Describe*, que contiene

la URL del archivo situado en el servidor DSS y un número de secuencia que aumenta con cada mensaje enviado. Como respuesta al mensaje del cliente, el servidor devuelve la descripción del archivo solicitado en formato del protocolo SDP. Una vez ejecutado el método *Describe*, el siguiente mensaje que hay que enviar al servidor es el correspondiente al método *Setup*, que contiene la URL del archivo, el identificador asociado a éste –extraído de la respuesta al método *Describe*–, el número de secuencia e indicaciones de qué protocolo utilizar para enviar el flujo de datos (RTP, TCP, HTTP), el modo de transmisión (Unicast o Multicast) y los puertos del cliente hacia donde se debe enviar este flujo de datos. Como respuesta a dicho método, el servidor devuelve el identificador de la sesión establecida y los puertos por los cuales el DSS enviará el flujo de datos. Después de reservar los recursos mediante la ejecución del método *Setup*, el cliente manda un último mensaje para iniciar la transmisión de datos. Este último mensaje corresponde a la ejecución del método *Play*, cuyo contenido es la URL del archivo, el número de secuencia y el identificador de sesión extraído de la respuesta al método *Setup*. Una vez terminado el proceso anterior exitosamente, el servidor DSS empezará la entrega del contenido de audio al cliente.

Implementación del protocolo RTP

Como ya se describió, el servidor DSS utiliza como protocolo de transporte el protocolo RTP. Cuando el archivo de audio codificado con el formato AMR es enviado dentro de la carga útil de un paquete RTP, su estructura difiere de la de un archivo AMR original [15] (figura 4), debido a que la lista de cabeceras es seguida por los marcos de audio (figura 6). La estructura de la carga útil –datos del archivo de audio– en un paquete RTP que contiene audio codificado con el formato AMR se denomina paquete RTP-AMR, el cual está formado por una cabecera adicional de 1 *byte* que contiene información acerca del audio codificado, además de las cabeceras y los marcos de audio.

5. Elemento *software* que representa una parte final en una comunicación bidireccional entre un programa servidor y uno o más programas clientes.

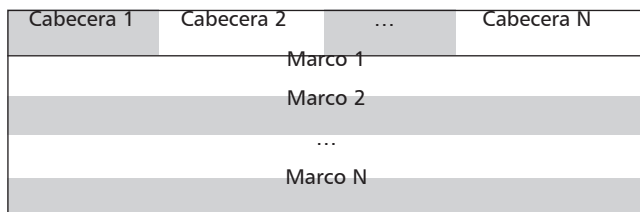


Figura 6. Audio AMR como carga útil en un paquete RTP.

En razón de que la versión JME del lenguaje Java no tiene soporte para el protocolo RTP, también se realizó la implementación de éste en la aplicación para el manejo de los paquetes RTP enviados por el servidor DSS al cliente. Para lograr lo anterior, la aplicación cliente sigue el proceso descrito a continuación:

1. *Abrir una conexión.* Cuando se solicita un archivo de audio al servidor, luego de la interacción con éste a través del protocolo RTSP, la aplicación abre una conexión por datagramas por el puerto especificado en el método *Setup* del protocolo RTSP, que será el canal por el cual se recibirán los paquetes RTP. Esta conexión se abre una sola vez por cada sesión RTSP establecida.
2. *Extracción de la carga útil.* Al recibir el paquete RTP la aplicación lo desempaqueta, extrayendo la cabecera y obteniendo la carga útil de éste, que es donde finalmente se encuentra el audio codificado con el formato AMR.

La extracción de la cabecera y demás datos útiles del archivo se hace desde el búfer de datos a través de las posiciones y mediante el corrimiento de bits, donde primero se extraen los doce *bytes* iniciales del paquete RTP recibido, que forman parte de la cabecera, y se obtiene la carga útil.

3. *Construcción del archivo AMR.* Como los datos del archivo de audio codificado como AMR se transmiten en paquetes RTP, la estructura enviada en la carga útil del paquete cambia y no es un archivo AMR como tal, por lo que la aplicación debe construir este archivo para que se pueda reproducir posteriormente. Una vez extraído el paquete RTP-AMR (carga útil) se extrae la cabecera principal, se organizan las demás cabeceras y los marcos de audio para construir el archivo AMR, y se agrega la cabecera propia de un archivo AMR (figura 4). Construido el archivo

AMR, éste se puede reproducir en la aplicación STREAMJASSMOBILE.

Reproducción del archivo de audio transmitido

El lenguaje de programación J2ME no tiene soporte para *streaming*, es decir, no hay una manera establecida para analizar y reproducir los datos que se envían desde el servidor de *streaming* en los dispositivos celulares que actúan como clientes. Por tal razón, se diseñó un esquema donde se construyen pequeños archivos AMR que contienen partes del archivo de audio original que se desea transmitir a los dispositivos clientes desde el servidor de *streaming* DSS.

El servidor DSS envía marcos de audio dentro de cada paquete hacia el cliente y éste debe esperar hasta tener una cantidad específica de marcos, para así construir el archivo AMR del paquete recibido y posteriormente cargarlo en el búfer de un objeto de la clase *Player*, el cual representa un reproductor de audio en el dispositivo cliente. Mientras una parte del archivo de audio es reproducido por un objeto *Player*, el servidor sigue enviando paquetes RTP. Por este motivo es necesaria la creación de un segundo objeto *Player* que vaya almacenando en su búfer los paquetes que se siguen recibiendo a través del protocolo RTP. El algoritmo utilizado para este proceso de reproducción del archivo de audio se ilustra posteriormente (tabla 1).

El proceso de reproducción del archivo de audio se repite durante toda la transmisión del archivo solicitado al servidor de *streaming*. Este proceso también puede verse en el tiempo, como se muestra a continuación (figura 7).

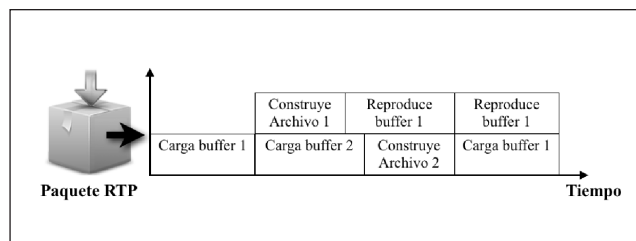


Figura 7. Reproducción paquetes RTP en STREAMJASSMO-

Tabla 1

Algoritmo de reproducción del archivo de audio enviado por el servidor de *streaming* hacia el cliente.

Datos entrada: Paquete RTP/AMR
Construir primer objeto Player
Llenar búfer del primer objeto Player con los datos
Crear archivo AMR
Reproducir primer objeto Player
Crear segundo objeto Player
Mientras se reciban paquetes RTP/AMR
Si segundo objeto Player terminó reproducción ó búfer segundo objeto Player vacío
Llenar búfer segundo objeto Player
Crear archivo AMR
Reproducir segundo objeto Player
Sino, Si primer objeto Player terminó reproducción
Llenar búfer primer objeto Player
Crear archivo AMR
Reproducir primer objeto Player
Fin Si
Fin Mientras
Liberar objetos Player

El proceso de solicitud/recibo de un archivo de audio en el sistema se puede resumir de la siguiente manera:

- a) El cliente inicia la aplicación en el dispositivo móvil celular.
- b) La aplicación se conecta al servidor web y obtiene un listado de los archivos de audio alojados en el servidor DSS.
- c) El cliente selecciona el archivo que desea escuchar desde la lista que muestra la aplicación móvil.
- d) La aplicación hace la conexión e interacción con el DSS por medio de los métodos ofrecidos por el protocolo RTPS.
- e) Establecida la sesión, el DSS inicia la transferencia de datos de audio hacia el cliente.
- f) La aplicación cliente recibe este flujo en paquetes RTP/AMR, que desempaqueta extrayendo la carga útil de éste.
- g) Con la carga útil recibida se construyen los archivos AMR, reproducidos por la aplicación con la ayuda de los dos objetos *Player* y como se indica en la tabla 1.

PRUEBAS

Para comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación *STREAMJASSMOBILE*, se le realizaron diferentes tipos de pruebas: pruebas unitarias, pruebas reales, pruebas de latencia según la red utilizada (redes móviles o redes inalámbricas) y comparaciones frente

a otras aplicaciones *streaming* de audio. Además, se consideraron aspectos importantes por ser una aplicación móvil, como el tamaño de la aplicación, el consumo de memoria y la pantalla del dispositivo [16].

Pruebas unitarias

Las pruebas unitarias permiten comprobar el correcto funcionamiento de las líneas de código desarrolladas para la aplicación móvil. Estas pruebas se aplican a clases o procesos principales de la aplicación de manera aislada, con el objetivo de anticipar posibles fallas, y se realizan continuamente durante el desarrollo. Se utilizó la librería *JMUNIT* [17] para CLCD 1.1 con el fin de poder hacer estas pruebas.

Pruebas de IGU y de petición, transmisión y reproducción de los archivos de audio

La aplicación *STREAMINJASSMOBILE* se probó en varios emuladores ofrecidos por diferentes marcas comerciales, como el Oracle-Java SDK 3.0⁶, Samsung SDK⁷, LG SDK⁸ y Nokia SDK⁹, al igual que en dispositivos móviles celulares reales que soportaban conexión a internet inalámbrico.

En la primera prueba efectuada se consideraron la usabilidad y visualización de la interfaz gráfica desarrollada. Con esta prueba se verificaron el fácil acceso de los menús proporcionados por la aplicación, la visualización correcta de las pantallas, comandos y demás elementos gráficos, y el correcto funcionamiento de toda la parte gráfica en general sobre diferentes aparatos celulares. Esta prueba resultó exitosa en los emuladores y dispositivos reales probados. Más adelante se muestra la parte de la aplicación encargada de mostrar el archivo de audio reproducido en tiempo real sobre uno de los emuladores y dispositivos celulares seleccionados (figura 8).

6. Kit de desarrollo de *software* (*Software Development Kit*) versión 3.0.
7. Kit de desarrollo de *software* para dispositivos celulares Samsung.
8. Kit de desarrollo de *software* para dispositivos celulares LG.
9. Kit de desarrollo de *software* para dispositivos celulares Nokia.

La segunda prueba estuvo relacionada con la petición, transmisión y reproducción de los archivos de audio alojados en el servidor de *streaming* DSS, y resultó exitosa cuando se realizó en los emuladores escogidos. Los emuladores hacen uso de la memoria y procesamiento del computador de escritorio o portátil donde se está ejecutando, pero no tienen en cuenta realmente las restricciones que poseen en estos recursos los dispositivos móviles celulares reales, por lo que se hace necesario efectuar dicho tipo de pruebas en dispositivos celulares reales, donde se pueda apreciar en verdad cómo será el comportamiento de la aplicación.

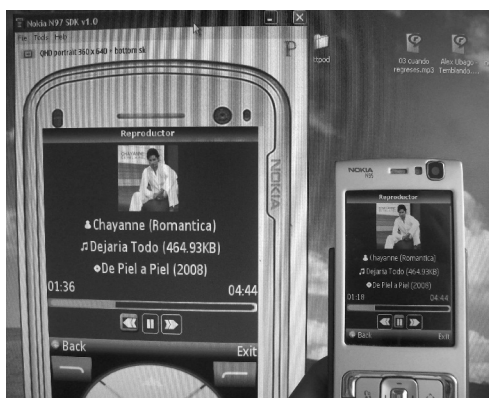


Figura 8. Prueba del funcionamiento de la aplicación móvil en el emulador y dispositivo real Nokia N95.

Posteriormente se presentan los resultados de la segunda prueba en los diferentes emuladores y dispositivos reales utilizados (tabla 2).

Los resultados marcados como “Exitoso” significan que el archivo de audio se pudo solicitar, transmitir o reproducir correctamente durante cada uno de los procesos involucrados. Sin embargo, durante la ejecución de la aplicación *STREAMJASSMOBILE* en los dispositivos móviles celulares reales, se puede apreciar una pequeña pausa en el audio durante algunas partes de la reproducción del audio, debido a la utilización de los dos objetos *Player*. Esta pausa se debe sobre todo al cambio de ejecución entre el primer y el segundo objeto *Player*, proceso que debe hacerse para mantener el archivo reproduciéndose continuamente mientras se reciben datos desde el servidor DSS.

Tabla 2

Resultados de las pruebas de funcionamiento de la aplicación móvil en emuladores y dispositivos reales

Emulador	Conexión servidor web	Servidor <i>streaming</i>	Reproducción
Sun Java Wireless Toolkit 2.5.2	Exitoso	Exitoso	Fallido*
Java Micro Edition SDK 3.0	Exitoso	Exitoso	Exitoso
LG SDK 1.5	Exitoso	Exitoso	Exitoso
Samsung SDK 1.1.2	Exitoso	Exitoso	Exitoso
Sony Ericsson SDK 2.5.0.6	Fallido**	Fallido**	Fallido**

Emulador	Servidor web	Servidor <i>streaming</i>	Reproducción
Nokia N95	Exitoso	Exitoso	Exitoso***
Nokia E72	Exitoso	Exitoso	Exitoso***
Sony Ericsson W580i	Exitoso	Fallido****	Fallido****

* Se comunica con el servidor y logra reproducir el audio de manera defectuosa. Cada paquete suena muchas veces, no permite la sincronización de los objetos *players*.

** La aplicación nunca se ejecutó en este emulador.

*** Reproducción del audio con pequeños cortes debido al cambio entre los objetos *players*.

**** El celular no soporta conexión por sockets.

Pruebas de latencia de la red

Para una buena calidad de servicio de *streaming* se deben utilizar las redes inalámbricas de última generación, las cuales son ideales para la transmisión de contenido multimedia. Las pruebas de latencia indican el tiempo que se requiere para establecer una sesión de *streaming* entre el dispositivo móvil celular y el servidor de *streaming* DSS. Más adelante se muestra la diferencia en tiempo entre las redes utilizadas para establecer este enlace entre el cliente y el servidor. Allí se puede observar la diferencia entre probar una aplicación móvil con un emulador y un dispositivo real. En este caso, debido a que el emulador se encuentra en un computador de escritorio, con velocidades de transmisión más altas que las que ofrecen las redes celulares, los tiempos de latencia son mínimos comparados con los obtenidos cuando se utiliza el dispositivo móvil celular real (figura 9).

Adicionalmente, se puede corroborar que la calidad de un servicio de *streaming* depende de las condiciones de la red, y en este caso en particular, dejando a un lado los tiempos de latencia obtenidos con el emulador, se observa que es mucho mejor el servicio en una red wifi debido a que en las redes de telefonía móvil no ofrecen velocidades para transferencia de contenido multimedia, a menos que se contrate este servicio.

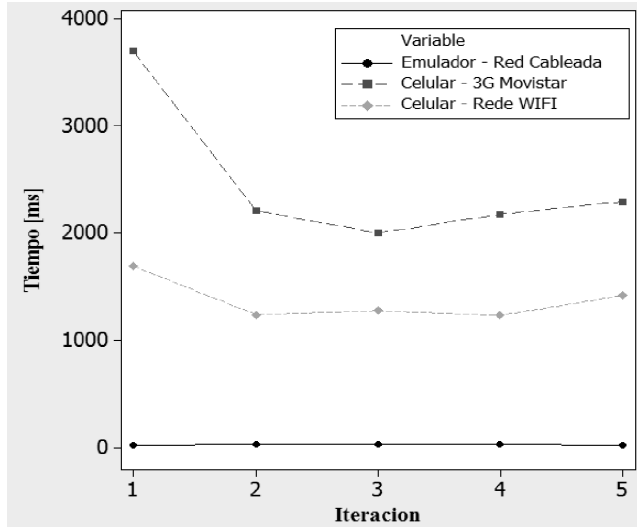


Figura 9. Comparación de latencia en redes celulares y wifi.

Comparaciones

En esta sección se presentan las comparaciones entre la implementación de un servicio de *streaming* utilizando el protocolo HTTP y el protocolo RTPS junto con el RTP. Además, se muestran algunas comparaciones entre la aplicación móvil desarrollada y otras que ofrecen servicio de *streaming* de audio.

Generalmente, cuando se accede a contenidos multimedia desde un dispositivo celular se hace uso del protocolo HTTP [18], el cual produce un retardo en los tiempos de reproducción debido a que el contenido ha de ser totalmente transferido para ser escuchado. Por tal razón se planteó el uso de protocolos propios de *streaming* (RTPS y RTP) para aligerar los tiempos de descarga y conservar la característica de tiempo real de estas aplicaciones.

A renglón seguido se muestra una comparación entre el tiempo que demora en empezar la reproducción de la aplicación desarrollada (STREAMJASSMOBILE), la cual utiliza los protocolos RTSP y RTP, y una pequeña aplicación desarrollada también en JME que utiliza el protocolo HTTP. Para la realización de las muestras se empleó una red WLAN con tecnología wifi, con un punto de acceso de 54 Mbps sobre un emulador.

Tabla 3
Comparación de tiempos de transferencia entre HTTP y RTSP-RTP

Tamaño archivo Tiempo [ms]	HTTP Tiempo [ms]	RTSP
824 KB	5470	2953
737 KB	5258	2215

Por otro lado, la aplicación desarrollada se comparó con otra aplicación *software* que ofrece reproducción de contenido multimedia a través de *Streaming: Real Player*¹⁰. Sin embargo, cabe anotar que esta comparación no se hace en las mismas condiciones debido a que Real Player está desarrollada en un lenguaje diferente del utilizado para el desarrollo de STREAMJASSMOBILE. Adicionalmente, la aplicación Real Player hace uso directo de los protocolos RTSP y RTP, lo cual no es posible con una implementación que utilice el lenguaje Java, el cual no tiene soporte de estos protocolos, como es el caso de la aplicación STREAMJASSMOBILE.

Las comparaciones se hicieron de manera subjetiva, debido a que la aplicación Real Player no permite el acceso al código fuente para realizar modificaciones y así tomar los tiempos de descarga requeridos por las dos aplicaciones en comparación. No obstante, las aplicaciones se ejecutaron al mismo tiempo en el emulador del Nokia N97 para observar cuál iniciaba primero la reproducción de un archivo de audio desde el servidor DSS, y se comprobó que STREAMJASSMOBILE y Real Player tienen tiempos de latencia casi iguales, con diferencias de tan sólo uno a dos segundos, siendo más rápida la aplicación desarrollada.

Consumo de memoria RAM

El consumo de memoria RAM permite conocer el manejo adecuado o inadecuado del recolector de basura¹¹ en la aplicación móvil, el cual es de vital importancia para la correcta ejecución de la aplicación, por lo que evita que ésta consuma de manera desequilibrada uno

10. Mayor información sobre Real Player, disponible en <http://latam.real.com/realplayer/>.

11. Un recolector de basura (del inglés *garbage collector*) es un mecanismo implícito de gestión de memoria implementado en algunos lenguajes de programación de tipo interpretado o semiinterpretado.

de los recursos más preciados en estos dispositivos de recursos limitados y evita comportamientos indeseados, como que se interrumpa la ejecución de la aplicación inesperadamente o el dispositivo celular se bloquee.

Estas pruebas se efectuaron con las herramientas de monitoreo preinstaladas en el Ambiente de Desarrollo Integrado Netbeans 6.8 [19]. Seguidamente se muestra una gráfica del consumo de memoria cuando se ejecuta la aplicación *software* cliente (figura 10).

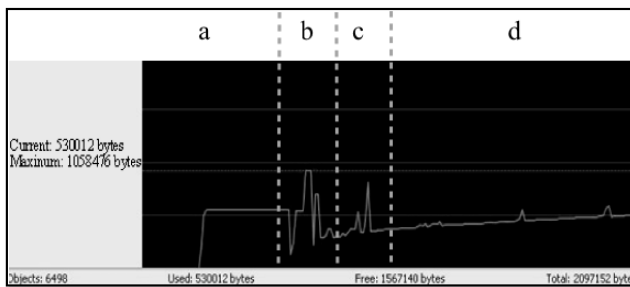


Figura 10. Monitoreo del uso de memoria RAM de STREAM-JASSMOBILE.

En la parte a) se puede apreciar una línea constante de consumo de memoria, que corresponde al momento en que el emulador carga la aplicación pero ésta aún no se ha ejecutado. Una vez iniciada la aplicación, se establece comunicación con el servidor web para hacer consultas a la base de datos; en este momento el consumo de memoria de dichas conexiones se refleja en los picos consecutivos de la imagen en la parte b). Posteriormente, cuando se inicia una comunicación con el servidor de *streaming*, debido a la solicitud de reproducción de un archivo de audio, también se requiere consumo de memoria para estas conexiones, lo que se ve reflejado en la parte c). Por último, cuando empieza una transmisión de *streaming*, se refleja una línea de consumo de memoria casi constante (parte d)); esto sucede porque la aplicación libera continuamente objetos y hace uso del recolector de basura para optimizar el consumo de memoria en el dispositivo. La aplicación consume aproximadamente 420 KB durante su ejecución, el pico más alto en la gráfica.

CONCLUSIONES

El sistema de *streaming* desarrollado provee una solución para la transmisión de audio multimedia en dispositivos móviles que no proveen una implementación de los protocolos propios de *streaming* (protocolos RTSP y RTP), por ejemplo en los dispositivos móviles celulares basados en tecnología Java ME. A pesar de que el lenguaje JME, utilizado para el desarrollo de la aplicación, no tenga el soporte para el manejo de los protocolos de *streaming*, es posible implementarlo con éxito en los dispositivos móviles, haciendo un uso correcto de la especificación de cada uno de los protocolos. Otro aspecto clave, y que además es un limitante en el éxito final del sistema, es que a causa de que la versión de Java ME no tiene soporte para *streaming* para reproducir un archivo de audio, éste debe estar totalmente cargado en un objeto *Player*. Dicho problema se puede solucionar con el uso de dos objetos *Player*, dos búferes y la construcción de pequeños archivos AMR. Sin embargo, esta solución puede considerarse aún debido a las pausas o cortes existentes durante el cambio de reproducción de los dos objetos *Player* utilizados, lo cual es un poco más notable en dispositivos celulares reales que en los emuladores.

Por otra parte, en razón de que el protocolo RTP no garantiza el envío íntegro de los paquetes, es necesario –y como sugerencia para futuros trabajos– realizar un control en la pérdida de paquetes, lo cual puede lograrse a través de la implementación del protocolo de control de tiempo real (*Real Time Control Protocol*, RTCP) [20].

REFERENCIAS

- [1] IETF, RFC 2326 (2009). *Real Time Streaming Protocol*. Disponible en <http://www.ietf.org/rfc/rfc2326.txt>. 15 de mayo.
- [2] IETF, RFC 1889 (2009). *Transport Protocol for Real-Time Applications*. Disponible en <http://www.ietf.org/rfc/rfc1889.txt>. 15 de mayo.
- [3] IETF, RFC 2327 (2010). *SDP: Session Description Protocol*. 22 de marzo.
- [4] Quintero O., Juan P. & Castro S., Cristian A. (2009). Evaluación de servidores *streaming* de video orientado a dispositivos móviles. Trabajo de grado (ingeniero electrónico). Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica, pp. 20-23. Disponible en <http://microe.udea.edu.co/proyectos/DMA>. 18 de octubre.
- [5] Pandora Internet radio. Servicio de *streaming* de audio. Disponible en <http://www.pandora.com/on-the-go/>.
- [6] Netflix Internet Subscription Service. Disponible en <http://www.netflix.com/MediaCenter>.
- [7] Magnus Sillen, Nordlund Jan (2010). Real-time audio streaming in a mobile environment using J2ME. Trabajo de maestría

- (Master's Thesis in Computing Science). Universidad Umeå. Department of Computing Science. Disponible en <http://www8.cs.umu.se/education/examina/Rapporter/SillenNordlund.ps>. 15 de mayo.
- [8] Prieto S., Felipe A. & Rodríguez, Luisa F. (2010). *Streaming de audio a través de dispositivos móviles utilizando J2me*. Universidad El Bosque. Facultad de Ingeniería de Sistemas. Disponible en <http://artemisa.unbosque.edu.co/facultades/sistemas/webinves/tesis0602/DocPrietoRodriguez.pdf>. 21 de marzo.
- [9] Bruce, Elbert & Bobby, Martyna (1994). *Client/Server computing: architecture, applications and distributed systems management*. Artech House.
- [10] Servidor Web Tomcat, The Apache Software Foundation (2009). Disponible en <http://tomcat.apache.org/>. 15 de noviembre.
- [11] Manejador de Base de Datos "MySQL", Oracle (2009). Disponible en <http://www.mysql.com/>. 15 de noviembre.
- [12] 3GPP TS 26.09 (2010). "Adaptive Multi-Rate (AMR) speech transcoding", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 12 de marzo.
- [13] Servidor de *streaming* "Darwin Streaming server", Apple (2009). Disponible en <http://dss.macosforge.org/>. 22 de noviembre.
- [14] Biswajit, Sarkar (2009). *LWUIT 1.1 for Java ME Developers*. Packt Publishing Ltd, 364 pp. ISBN 978-1-847197-40-5. 12 de enero de 2010.
- [15] IETF, RFC 3267 (2010). *Real-Time Transport Protocol (RTP) Payload Format and File Storage Format for the Adaptive Multi-Rate (AMR) and Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) Audio Codecs*. 20 de marzo.
- [16] Dantas, V.L.L., Marinho, F.G., Da Costa, A.L. & Andrade, R.M.C. (2009). *Testing Requirements for Mobile Applications*. IEEE (online). Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>.
- [17] Proyecto Framework para pruebas unitarias sobre aplicaciones JME - "JMUNIT" (2010). Disponible en <http://jmunit.sourceforge.net/> 13 enero.
- [18] IETF, RFC 2616 (2009). *Hypertext Transfer Protocol (HTTP)*. 18 de noviembre.
- [19] Especificación del Perfil Midlet (Midlet Profile) (2010). Disponible en <http://developers.sun.com/mobility/midp/articles/wtk104/>. 23 de julio.
- [20] IETF, RFC 3605 (2010). *Real Time Control Protocol (RTCP) attribute in Session Description Protocol (SDP)*. 12 de mayo.

Tomografía sísmica a partir de registros de SPT

Seismic tomography from SPT data

JORGE ALBERTO RODRÍGUEZ

Profesor de planta de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
rodriguezja@javeriana.edu.co.

Recibido: 26/10/2010 Aceptado: 27/11/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se explora la posibilidad de determinar perfiles de suelos utilizando tomografía sísmica mediante la medición de tiempos de arribo en superficie de ondas producidas en profundidad en el terreno, en la medida en que se hace el ensayo de penetración estándar. El ensayo realizado consistió en el registro de los golpes generados por el SPT mediante doce geófonos colocados en superficie, a una separación de 4 m entre ellos a lado y lado del sitio de la perforación y medidos mediante un sismógrafo de refracción. La señal de la onda generada por el SPT es muy clara en todos los geófonos hasta 50 m del sitio de la perforación, aun cuando en general hay vibraciones ambientales significativas. Estos registros tienen en general mucha mejor relación señal a ruido que los del ensayo de *down hole*, con la ventaja de que corresponden al mismo evento para todo el rango de profundidades y se tienen varios registros correspondientes a cada uno de los golpes del ensayo de SPT a cada profundidad.

Con base en los datos obtenidos, comparados con otras mediciones realizadas en el sitio, se concluye que el método de interpretación analizado permite obtener resultados al menos tan confiables y consistentes como los de otros métodos geofísicos aplicables en la actualidad. Este método se puede utilizar de manera efectiva para obtener perfiles de Vs como alternativa de ensayos, tales como el de *down hole*.

Abstract

This article explores the possibility of identifying soil profiles using seismic tomography from arrival times measured on the surface of waves produced in depth by the standard penetration test. The test performed consisted of registration of shocks generated by the SPT through 12 geophones placed on surface at 4 m apart from each side of the drilling site and measured by a 24-channel refraction seismograph.

The signal generated by the SPT is very clear in all the geophones in spite of significant environmental noise. Generally, these records have much better signal to noise ratio than that of the down hole test, and have the advantage that correspond to the same event for the entire range of depths. It has several records corresponding to the blows of the SPT test at each depth.

Based on the data, we conclude that the method of interpretation of seismic tomography of the vibrations generated by the SPT and measured on surface allows obtaining results at least as reliable and consistent as those of other currently applicable geophysical methods. We can effectively use this method to obtain profiles of Vs as an alternative of tests such as down hole. The new method does not need to install pipes. It overcomes limitations and coupling problems of down hole testing.

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 1974, Yutaka Ohta y Noritoshi Goto realizaron un experimento en Sapporo (Japón) con el objeto de desarrollar una técnica para medir la velocidad de onda de corte simultáneamente con el ensayo de penetración estándar, aprovechando que este es el método más común de exploración geotécnica. De acuerdo con el artículo publicado por Ohta et ál. en 1978, durante las pruebas de penetración estándar se generan ondas elásticas en el fondo de la perforación por el impacto del muestreador. Si los arribos de dichas ondas se registran en superficie, las velocidades de onda de corte V_s pueden obtenerse mediante un análisis del tiempo de viaje y el recorrido de la señal entre la profundidad del impacto y la superficie.

Según Ohta et ál., durante el desarrollo de un ensayo de penetración estándar tradicional el impacto en el fondo de la perforación genera varios tipos de ondas, cuya identificación no resulta evidente, ya que el mecanismo de la penetración parece muy complicado. Sin embargo, una interpretación simplificada del evento, como una fuerza vertical aplicada en profundidad en un medio elástico, puede ser un modelo bastante bueno para representar la generación de ondas por el efecto de la penetración del muestreador.

En coordenadas esféricas (r, θ, Φ), si una fuerza de magnitud G dependiente del tiempo actúa en el origen de la dirección vertical ($\Phi = 0$), los tres componentes del desplazamiento (u_r, u_θ, u_Φ) en profundidad estarían descritos como:

$$u_r = \frac{G \cos\varphi}{4\pi\rho\alpha^2 r} g\left(t - \frac{r}{\alpha}\right)$$

$$u_\theta = 0$$

$$u_\Phi = \frac{G \sin\varphi}{4\pi\rho V_s^2 r} g\left(t - \frac{r}{V_s}\right)$$

Donde α es la velocidad de onda de compresión (p), V_s de la velocidad la onda corte (s) y ρ la densidad del material.

De acuerdo con lo anterior, es claro que el desplazamiento radial u_r se debe sólo a las ondas p , mientras la componente tangencial u_Φ es atribuible solamente a la acción de las ondas s .

La relación de amplitud entre las ondas p y las ondas s está dada por α^2/V_s^2 , por lo que se espera, en

general, que las ondas s resulten de mayor amplitud que las ondas p .

Lo expuesto anteriormente resulta beneficioso para las mediciones de ondas s originadas por el impacto del muestreador durante ensayos de penetración estándar, dado el predominio en el registro de las ondas de corte generadas en la prueba.

En el presente artículo se muestran los resultados de mediciones de vibraciones producidas por medio de la realización del ensayo en una perforación y registradas en superficie mediante un sísmógrafo de 24 canales. El sitio de exploración se localizó en la finca La Pelusa, ubicada en el kilómetro 3 en la vía que comunica los municipios de El Rosal y Facatativá, en el departamento de Cundinamarca (Colombia). Este es un lugar de experimentación geotécnica que ha servido para efectuar diversas mediciones, con el fin de evaluar y calibrar diferentes métodos de exploración geotécnica (Aponte, 2011; Díaz, 2011; Restrepo, 2010).

INFORMACIÓN DE REFERENCIA PARA VALIDACIÓN

Para el desarrollo de la prueba se registraron algunos de los ensayos de penetración estándar hechos en una perforación realizada para otro proyecto en el sitio (Restrepo, 2010). De acuerdo con esto, el sector donde se llevó a cabo la prueba está localizado regionalmente sobre conos y lóbulos coluviales de formas convexas e inclinaciones suaves, generados por depósitos recientes con granulometría fina donde la composición predominante es areno-arcillosa de la formación Subachoque. Dichos depósitos se encuentran subyacidos por arcillolitas grises oscuro y claro, intercaladas con paquetes de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso pertenecientes a la formación Guaduas.

Localmente, el sector de prueba ocupa áreas de relieve plano a levemente inclinado con dirección predominante al sureste, el cual, de acuerdo con la exploración realizada, presenta una estratigrafía aproximadamente horizontal, integrada en los primeros 2 m por limos orgánicos de alta plasticidad y baja resistencia, subyacidos hasta los 17 m de profundidad por intercalaciones de arcillas arenosas de alta y baja plasticidad, en espesores que varían entre 1,5 y 5,0 m. A partir de 17 m y hasta 18,5 m se encuentran arenas arcillosas de compacidad densa. Finalmente, entre 18,5 y 30 m se observan arcillas arenosas de baja plasticidad y consistencia firme a dura.

Es importante destacar el componente arenoso establecido para el perfil de suelo, que varía entre 15 y 60%. A continuación se muestra la estratigrafía establecida por Restrepo (2010) para el sitio de prueba, junto con el perfil de valores de SPT. La estratigrafía se consideró horizontal para efectos de la investigación, aunque la evidencia de líneas de geofísica indica que hay algunas variaciones longitudinales de los estratos en el área. Estas variaciones no son muy grandes y no se contó con suficiente información para tratar de identificarla con las mediciones realizadas a partir del SPT (figura 1).

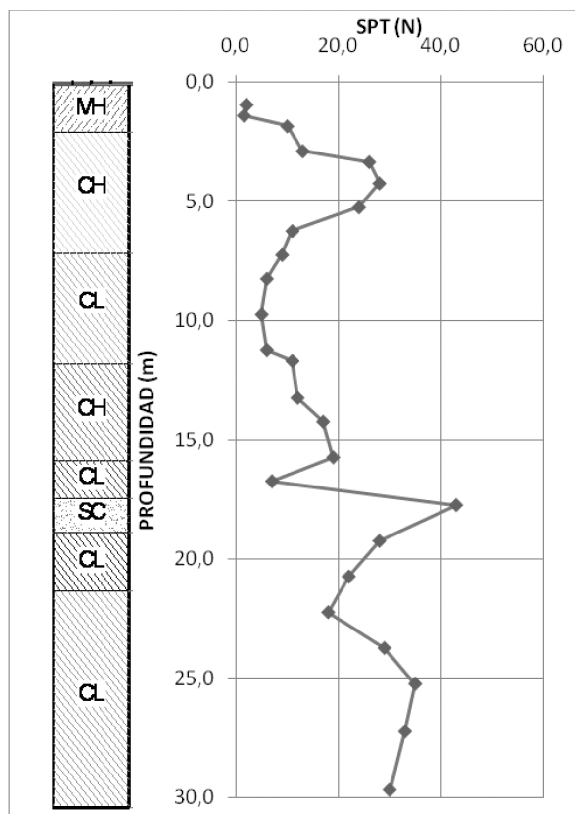


Figura 1. Perfil estratigráfico establecido por Restrepo (2010).

Como parte de las actividades para caracterización del sitio de experimentación se han realizado ensayos de SPT, piezocono (CPTU), *down hole*, y mediciones geofísicas de superficie mediante análisis de refracción, dispersión de ondas superficiales con fuentes activas (MSAW), Geogiga (2011), y con fuentes pasivas (ReMi) (Louie, 2001). Además, se han hecho ensayos de labo-

ratorio sobre muestras obtenidas en las perforaciones. Los resultados de las mediciones geofísicas se presentan a continuación junto con la velocidad de onda de corte, calculada a partir del registro de un ensayo de CPTU (Díaz, 2011) (figura 2).

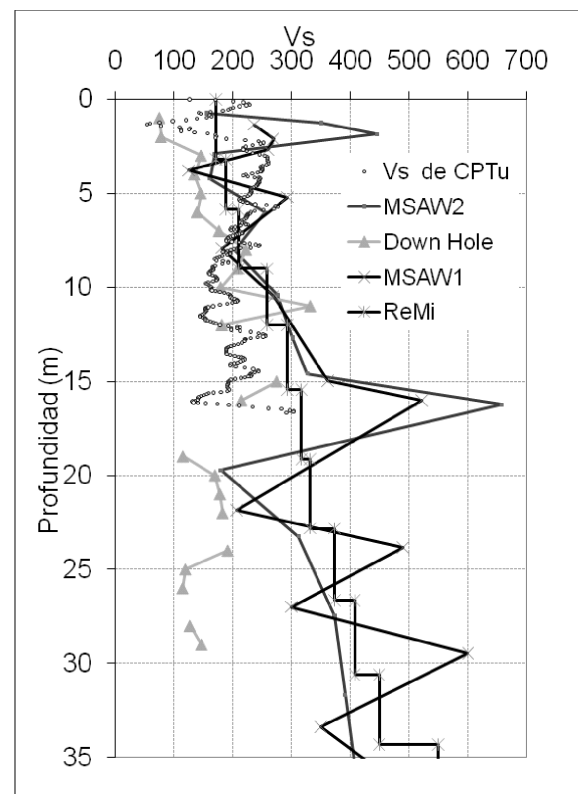


Figura 2. Perfil de Vs establecido para el sitio de pruebas mediante ensayos *down hole*, CPTU, y geofísica superficial (MSAW y ReMi).

Durante la instalación de la tubería para la realización del ensayo de *down hole*, no fue posible inyectar adecuadamente lechada alrededor del tubo entre éste y la pared de la perforación, por lo que la calidad de la información de este ensayo tiene incertidumbres.

ENSAYO REALIZADO

El ensayo e interpretación realizado para el proyecto de grado de maestría por el ingeniero Javier Aponte (Aponte, 2011), con la dirección del autor, consistió en el registro de los golpes generados por el SPT mediante geófonos colocados en superficie a una separación de

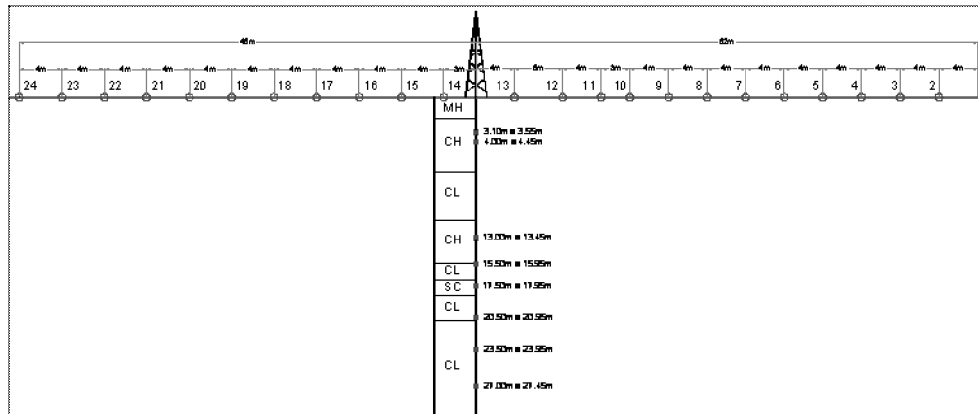


Figura 3. Localización de geófonos en superficie y profundidad a las que se hizo el ensayo de SPT registrado para los análisis.

4 m entre ellos a lado y lado del sitio de la perforación (figura 3). En esta figura se muestran también las profundidades de los ensayos de SPT registrados y analizados para el presente estudio. Los registros se hicieron con geófonos de 4,5 Hz de frecuencia fundamental y un sismógrafo de 24 canales de 24 bits de resolución, con muestreo a una tasa de 2 ms. Nótese que la señal de la onda generada por el SPT es muy clara en todos los geófonos hasta 50 m del sitio de la perforación, aun cuando en general hay vibraciones ambientales signifi-

cativas. Estos registros tienen en general mucha mejor relación señal a ruido que los del ensayo de *down hole*, con la ventaja de que corresponden al mismo evento para todo el rango de profundidades, y se tienen varios registros correspondientes a cada uno de los golpes del ensayo de SPT a cada profundidad. Esto indica que la señal generada por la prueba del SPT se puede utilizar con mucho beneficio para obtener perfiles de Vs, como se discute a continuación (figura 4).

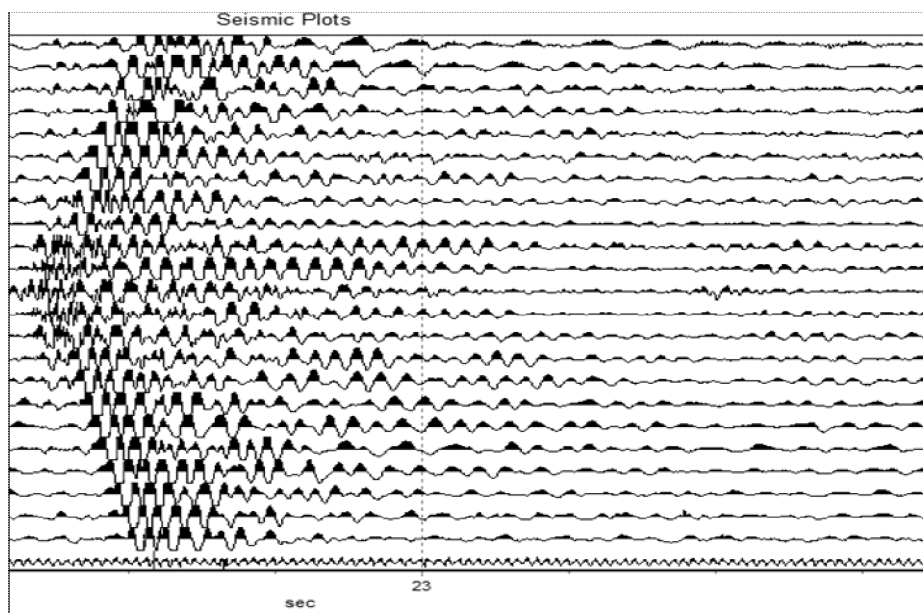


Figura 4. Registros de tiempos de arribo del impacto del SPT realizado a 21 m. Las marcas rojas indican el registro del arribo de ondas S utilizado en cada geófono.

INTERPRETACION DEL ENSAYO

Para el análisis de los datos con el fin de verificar si es posible el cálculo de velocidades de onda de corte con base en los registros obtenidos, se planteó discretizar el perfil en espesores de 1 m y emplear un sistema de ecuaciones que buscan, con base en la ley de Snell, calcular para cada metro de espesor las velocidades y trayectorias de propagación de la perturbación generada por el SPT en profundidad, teniendo como restricción el tiempo de arribo medido y la distancia a la perforación del geófono analizado. A continuación se muestra esquemáticamente el modelo de análisis empleado para cada uno de los ocho ensayos SPT registrados, y para cada uno de los 24 geófonos que incluye cada medición. Se debe notar que no hay que hacer una interpretación con base en trayectorias lineales desde la profundidad de origen de la onda hasta la superficie, ya que la trayectoria de las ondas no es lineal sino sólo en cada capa de velocidad constante, y cambia de dirección por difracción en las interfaces entre capas de diferente velocidad (figura 5).

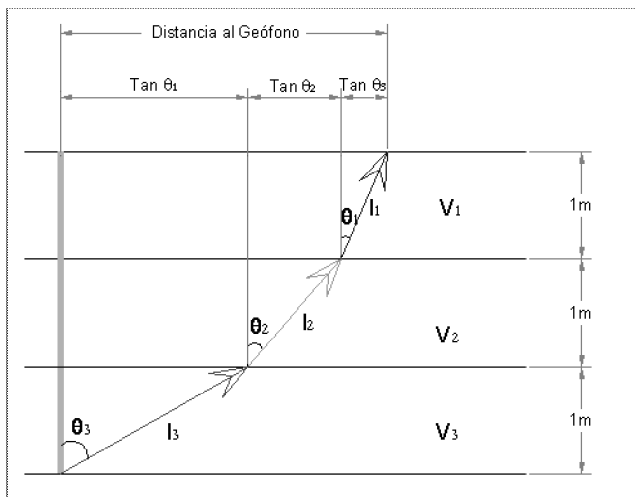


Figura 5. Esquema del modelo de propagación basado en la ley de Snell.

Para el modelo mostrado, se tiene la distancia recorrida por la señal calculada para cada metro de profundidad como:

$$l_n = \frac{1}{\cos \theta_n}$$

Por lo que, en consecuencia, tendríamos el tiempo para el mismo caso calculado como:

$$t_n = \frac{1}{\cos \theta_n} \frac{1}{v_n}$$

Por lo que el tiempo de arribo registrado por cada geófono para su caso particular de distancia a la perforación y profundidad del ensayo SPT sería:

$$\sum t_n = \text{tiempo de arribo}$$

De acuerdo con la ley de Snell, la relación entre las velocidades y los ángulos de incidencia y refracción está dada por:

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2} = \frac{v_3}{\sin \theta_3} = \dots$$

El valor de la relación $v_n / \sin \theta_n$ debe ser igual para cada estrato de 1 m de espesor analizado.

Teniendo para cada estrato de 1 m de espesor analizado la $\tan \theta_n$ como la proyección horizontal de la trayectoria recorrida por la señal, la distancia horizontal al geófono puede calcularse como:

$$\sum \tan \theta_n = \text{distancia al geófono}$$

Cabe destacar la redundancia en el cálculo de las velocidades para cada metro de suelo y para cada geófono localizado a lo largo de la línea instrumentada, lo que permite asignar un alto nivel de confianza en los resultados obtenidos mediante esta metodología, más aún cuando para nuestro caso particular y con base en los otros resultados de la caracterización del sitio, el perfil del suelo muestra incremento de la rigidez con la profundidad, lo que permite asignar como restricción adicional a nuestro modelo que tanto las velocidades como los ángulos de incidencia y refracción deberán aumentar con la profundidad.

Una vez establecido y parametrizado el modelo de análisis que hay que emplear para la interpretación de los registros, se procedió a implementar una metodología de solución al modelo mediante el uso del programa Excel y de su aplicación *Solver*, la cual básicamente permite encontrar una solución exacta u optimizar las

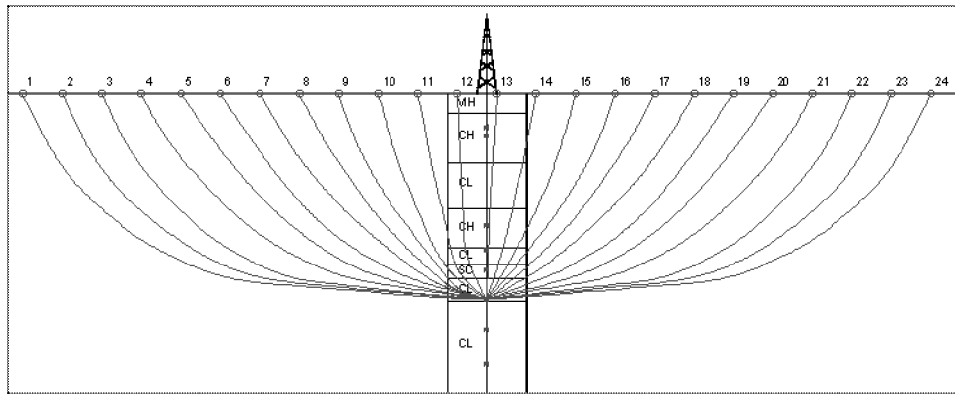


Figura 6. Modelo de propagación basado en la ley de Snell ReMi para una profundidad de 21,00 m (las líneas representan las trayectorias desde el impacto en profundidad hasta los geófonos en superficie).

posibles soluciones de una ecuación planteada en la hoja de cálculo, iterando y restringiendo los valores de las variables que intervienen en dicha ecuación. Esto último fue lo que se hizo en este caso.

En la figura 6 se ilustran los patrones de viaje de las ondas generadas en uno de los ensayos a 21 m de profundidad. Se aprecia cómo los patrones de propagación se curvan con la distancia en función de la variación de las velocidades consideradas en el perfil de acuerdo con la ley de Snell. En la figura 7 se presentan los tiempos de arribo de las ondas medidos para el mismo ensayo.

Es interesante observar en primer lugar cómo, de

acuerdo con las gráficas tanto de tiempos medidos según los registros de la prueba, como de tiempos calculados mediante el modelo basado en la ley de Snell, los intervalos de tiempo para la misma profundidad van reduciéndose conforme ésta aumenta. Lo anterior conduce a que, para distancias a la perforación menores a 20 m, aproximadamente, los valores de tiempo para el mismo geófono se incrementen con la profundidad, mientras a partir de dicha longitud, los valores decrecen a medida que los valores de profundidad aumentan. Dicha variación es atribuible básicamente a dos factores. El primero es el incremento de la rigidez con la

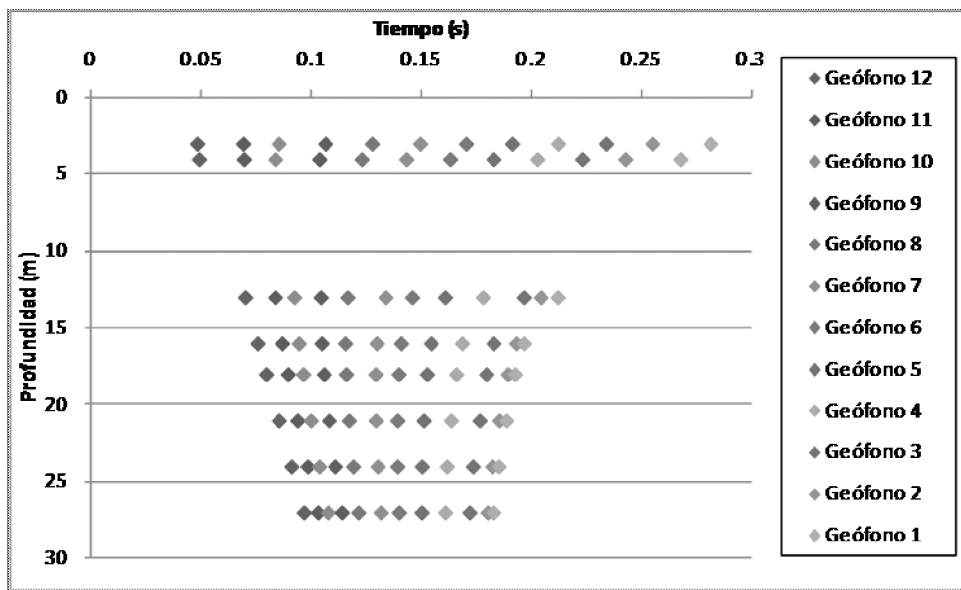


Figura 7. Tiempos de arribo calculados para los geófonos localizados al lado izquierdo de la perforación para la medición del SPT a 21 m de profundidad.

profundidad y el segundo es la horizontalidad asumida para los estratos que subyacen el sitio de pruebas. La interacción de estos dos factores permite que conforme se vaya profundizando en el perfil de suelo, se incremente la velocidad inicial con la que viaja el frente de ondas hasta el geófono, al tiempo que la distancia recorrida por dicho frente en los estratos más rígidos sea mayor.

En la figura 8 se presentan los resultados de la interpretación de las mediciones realizadas de SPT a siete profundidades a partir de los cuales se obtuvo el perfil de Vs que se muestra, comparado con los de los otros ensayos geofísicos realizados. Se puede observar que a pesar de que se tuvieron sólo mediciones a siete niveles, los valores de Vs obtenidos son muy consistentes entre todas las mediciones, en particular hasta 15 m de profundidad. A esta profundidad se sabe, a partir de los datos de SPT y CPTU, que hay una capa de arena muy densa, lo cual representa una limitación de resolución

para todas las mediciones geofísicas realizadas, aunque los datos de MSAW muestran un incremento de velocidad a este nivel.

Los datos del *down hole* por debajo de los 15 m indican valores más bajos que los otros métodos, pero se sabe que hubo problemas en la instalación de la tubería para este ensayo y el hueco no quedó bien cementado. A los 15 m comienzan los niveles arenosos y es muy posible que el hueco se haya derrumbado, lo que no permite que la lechada haya obturado bien la perforación y las mediciones así realizadas no son confiables. Esta es una situación muy común en la instalación de tuberías para ensayos de *down hole* que puede afectar significativamente los resultados de este tipo de medidas. Con base en los datos obtenidos se concluye que el método de interpretación de tomografía sísmica de las vibraciones generadas por el ensayo de SPT, y medidas en superficie, permite obtener resultados al menos tan confiables y consistentes como los de otros métodos geofísicos aplicables en la actualidad.

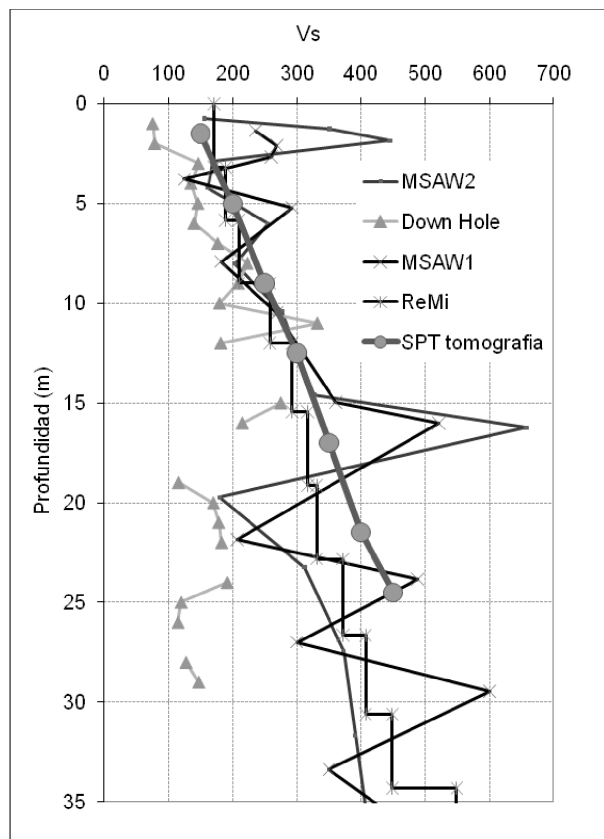


Figura 8. Resultados de la interpretación del perfil de Vs mediante tomografía, a partir de registros del SPT comparado con los de los otros métodos de medición geofísica empleados.

CONCLUSIONES

El uso de los perfiles de velocidad de onda de corte en suelos es el principal insumo para la clasificación sísmica de sitio, de acuerdo con la norma NSR10 y la mayor parte de las normas internacionales. También es básico para la realización de estudios de respuesta sísmica local, microzonificación sísmica, y para obtener parámetros confiables de rigidez del terreno en sitio para análisis geotécnicos en general.

En el presente artículo se explora la posibilidad de determinar perfiles de suelos utilizando tomografía sísmica mediante la medición de tiempos de arribo en superficie de ondas producidas en profundidad en el terreno, en la medida en que se hace el ensayo de penetración estándar. Se muestra cómo este método se puede aplicar en forma exitosa para obtener perfiles de Vs utilizando sismógrafos y sensores convencionales de refracción sísmica. Dicho método se puede utilizar de manera efectiva para obtener perfiles de Vs como alternativa de ensayos tales como el de *down hole*. El nuevo método no tiene necesidad de instalar tuberías y evita las limitaciones y problemas de acople de esta tubería en el terreno, los cuales se requieren para los ensayos de *down hole*. La relación señal a ruido obtenida mediante la generación de vibraciones en el ensayo

de SPT es mucho mejor que en el ensayo de *down hole* convencional, ya que se trata de un impacto de gran energía que produce ondas de compresión y de corte de enorme intensidad, que son fácilmente identificables en los sismogramas. También se puede realizar con equipos de refracción sin requerir una sonda especial para el *down hole*, y permite reducir la incertidumbre y obtener información redundante, con la cual se puede hacer una sección en lugar de sólo un sondeo puntual.

REFERENCIAS

- Aponte, J. (2011). Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Proyecto de grado de maestría. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Díaz, G. (2011). Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTU. Proyecto de grado de maestría. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Geogiga Corp. (2011). Geogiga seismic - shallow seismic data processing and interpretation software package.
- Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bull. Seism. Soc. Am*, 91, 347-364.
- Ohta, N., Goto, N., Kagami, H. & Shiono, K. (2011). 11978, Shear wave velocity measurement during a Standard Penetration Test. *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol. 6, 43-50.
- Restrepo, V. (2010). Interpretación del ensayo de penetración estándar instrumentado y su relación con la prueba dinámica de carga en pilotes. Proyecto de grado de maestría. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Evaluación del desempeño de una pista de prueba a escala real, utilizando mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho proveniente de llantas recicladas y otros modificadores

Performance assessment of a real scale test track by using asphaltic mixes modified with rubber scraps from recycled tires and other modifiers

GILBERTO MARTÍNEZ ARGÜELLES¹, LIBARDO ALFONSO CELIS YARURO²,
JUAN PABLO NIETO MORA³, ÓSCAR MAURICIO VELÁSQUEZ BOBADILLA⁴
Y DAVID GONZÁLEZ HERRERA⁵

1. Ingeniero civil, M.SC. en Infraestructura Vial. Docente del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto de Colombia. Coordinador técnico del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá. gibemarti@gmail.com, gilberto-martinez@unipiloto.edu.co.

2. Ingeniero civil de la Universidad de La Salle, Colombia. Ingeniero especialista de la Dirección Técnica Estratégica del Instituto de Desarrollo Urbano. libardo.celis@idu.gov.co.

3. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero asesor de la Dirección Técnica Estratégica del Instituto de Desarrollo Urbano. juan.nieto@idu.gov.co.

4. Ingeniero civil de la Universidad Católica de Colombia. Ingeniero especialista de la Dirección Técnica Estratégica del Instituto de Desarrollo Urbano. mauricio.velasquez@idu.gov.co.

5. Ingeniero civil de la Universidad del Cauca. Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos (España). Ingeniero asesor de la Dirección Técnica Estratégica, Instituto de Desarrollo Urbano. dagonher@cable.net.co.

Recibido: 30/10/2010 Aceptado: 28/11/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se presenta el desempeño de un tramo de prueba a escala real construido con el fin de verificar el desempeño de mezclas asfálticas fabricadas con asfalto modificado, proveniente de desechos de llantas en Colombia. El tramo está compuesto por cinco secciones: dos secciones en las cuales se aplican mezclas con asfalto modificado por vía húmeda y por vía seca, respectivamente; un tramo con mezcla asfáltica con asfalto convencional, y dos secciones con asfalto modificado con polímeros SBR y SBS. La sección construida por vía seca presentó un deterioro prematuro y no se incluirá en este artículo. Todos los tramos se diseñaron usando una granulometría continua, utilizando el mismo espesor de carpeta asfáltica para condiciones de soporte homogéneas en todos los tramos. La pista de prueba se sometió a tráfico compuesto por vehículos de servicios públicos y vehículos pesados. Se incluyen los resultados del diseño del asfalto modificado con grano de caucho

reciclado y el diseño de las mezclas, así como también el reporte del desempeño de la pista de prueba durante cuatro años de servicio. El seguimiento ha consistido en inventario de fallas, medición de deflexiones por medio de un deflectómetro de impacto (*Falling Weight Deflectometer*, FWD) y medición de espesores con georradar (GPR). Se hace una comparación analítica utilizando técnicas de retrocálculo, con el fin de determinar la capacidad estructural de cada tramo y la influencia de cada capa asfáltica en el deterioro de las secciones. Los resultados han mostrado que las mezclas modificadas con grano de caucho reciclado por vía húmeda presentan un excelente desempeño, comparable con las mezclas modificadas con polímeros.

Palabras claves: pista de prueba, mezclas asfálticas, asfaltos modificados, asfalto-caucho, pavimentos.

Abstract

This article shows the performance of a real scale test track. It was built to check the performance of asphaltic mixes made of modified asphalt with recycled tires in Colombia. The track consists of five sections-two sections used to apply asphalt mixes modified by moisture and dryness, respectively; a section with normal asphalt mix, and two sections with asphalt modified with SBR and SBS type of polymer. Section built by dryness early deteriorates and we will not introduce it in this paper. We use a continuous granulometry to build all sections. In all sections, we utilize an asphaltic carpet of equal thick in homogeneous support conditions. The test track was submitted to traffic of weight vehicles and those of public service. In this paper, we introduce the findings of the design of the modified asphalt with scrap of recycled rubber, that of the mixes and the report of the track perform after four years in service. Following has consisted of fails inventory, deflections measurement, by using a falling weight deflectometer, measurement of thickness with ground penetrating radar. We use retro-calculation techniques to introduce an analytical comparison to determine the structural capacity in each section and the influence of each asphaltic layer in the sections destruction. The findings show the performance of mixes modified with scraps of recycled rubber by moisture is excellent, compared to that of the mixes modified with polymers.

Keywords: test track, asphaltic mixes, modified asphalts, asphalt-rubber, road surfaces.

INTRODUCCIÓN

El asfalto-caucho (asfalto modificado con desechos de llantas trituradas), que se está usando actualmente en muchos países del mundo, muestra como principales ventajas en su aplicación el buen desempeño en cuanto a resistencia a fatiga, al ahuellamiento, alta resistencia a la fisuración por reflejo de juntas y fisuras (Zareh y Way, 2006), que van de la mano con las notables reducciones en costos de mantenimiento. Con la incorporación del grano de caucho proveniente de llantas en las mezclas asfálticas, se busca dar solución al problema ambiental que se ha generado con la disposición de las llantas cuando han terminado su tiempo de servicio. Ventajas adicionales en la contaminación sonora se han encontrado en las mezclas con asfalto-caucho, que se manifiestan en reducciones importantes en los niveles de ruido generado por la interacción llanta-pavimento (Ballie y Roffé, 2006).

En el presente artículo se describe el proceso realizado para la producción de mezclas asfálticas modificadas con asfalto-caucho dentro del contexto colombiano. Además, se reportan los resultados del diseño del asfalto-caucho, así como de la caracterización de la mezcla asfáltica en laboratorio, y el desempeño mostrado por

un tramo de prueba en escala real durante cuatro años de servicio.

El tramo de prueba está compuesto por cinco secciones: dos secciones en las cuales se aplican mezclas con asfalto modificado con grano de caucho por vía húmeda y por vía seca, respectivamente; un tramo con mezcla asfáltica con asfalto convencional, y dos secciones con asfalto modificado con polímeros comerciales SBR y SBS. La sección construida por vía seca presentó un deterioro prematuro y no se incluirá en este artículo. Todos los tramos se diseñaron con una granulometría continua, usando el mismo espesor de carpeta asfáltica para condiciones de soporte homogéneas en todos los tramos. La pista de prueba se ha sometido a tráfico compuesto por vehículos de servicios públicos y vehículos pesados. Se incluyen los resultados del diseño del asfalto modificado con grano de caucho reciclado y el diseño de las mezclas, así como también el reporte del desempeño de la pista de prueba durante cuatro años de servicio. El seguimiento ha consistido en inventario de fallas, medición de deflexiones por medio de un deflectómetro de impacto (*Falling Weight Deflectometer*, FWD) y medición de espesores con georradar (GPR). Se hace una comparación analítica utilizando técnicas de retrocálculo, con el fin de determinar la capacidad estructural de cada tramo y la influencia de cada capa asfáltica en el deterioro de las secciones.

MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

Grano de caucho

El grano de caucho empleado para el estudio se obtuvo por la trituración a temperatura ambiente de llantas convencionales, trituración que presentó como resultado una distribución de tamaños, cierto porcentaje de los cuales fue mayor de 2 mm, por lo que se escogieron los tamaños inferiores al tamiz N.º 30 (595 μm). La granulometría del caucho se puede observar a continuación (tabla 1).

Tabla 1
Distribución granulométrica del grano de caucho

Tamaño		% que pasa
595 μm	N.º 30	100
297 μm	N.º 50	7,5
74 μm	N.º 200	1,5

Ligantes asfálticos

Un cemento asfáltico de la refinería de Barrancabermeja, con grado de penetración 80-100, se utilizó como cemento base para modificación mediante el proceso por vía húmeda, el cual se denominará B80-100; adicionalmente se estudiaron dos cementos asfálticos modificados comerciales con polímeros, estireno butadieno estireno-PMBSBS y estireno butadieno rubber-PMBSBR, con el propósito de comparar el desempeño de cada mezcla en el estudio.

La dosificación escogida para el cemento B80-100 fue 18% de grano de caucho con respecto al peso del cemento asfáltico y un 82% restante de B80-100, modificado durante 25 minutos (tiempo de reacción). Esta formulación se obtuvo luego de considerar viscosidad rotacional (aparato de Brookfield), tiempo de reacción, caracterización reológica utilizando los métodos de envejecimiento del Protocolo SuperPave y caracterización física de diferentes dosificaciones. Para todos los cementos asfálticos usados se llevó a cabo una completa caracterización física.

Mezclas asfálticas

Todas las mezclas asfálticas se elaboraron empleando agregados pétreos ampliamente utilizados en la ciudad de Bogotá. Se escogió una mezcla con granulometría CA 0/14 para la elaboración de todas las mezclas. La distribución granulométrica de la mezcla 0/14 se presenta a renglón seguido (tabla 2).

Tabla 2
Distribución granulométrica mezcla asfáltica 0/14

Tamaño mm	Mezcla 0/14 % que pasa
14	94 - 100
10	72 - 84
6,3	50 - 66
4	40 - 54
2	28 - 40
0,08	7 - 10

Las mezclas asfálticas se denotaron como se muestra a continuación: mezcla asfáltica (AM) con cemento asfáltico B80-100 (AM80100), mezcla asfalto-caucho modificada por medio del proceso húmedo (ARW80100),

mezcla con polímero SBS (PMSBS) y mezcla con polímero SBR (PMSBR). A continuación se muestran los diseños para cada tipo de mezcla (tabla 3).

Tabla 3
Resultados del diseño de las mezclas asfálticas

Mezcla asfáltica	Gravedad específica Bulk	Vacíos (%)	Contenido de asfalto (%)
AM80100	2,13	6,5	6,89
ARW80100	2,13	6,5	6,78
ARD80100	2,09	6,0	6,78
PMSBS	2,16	6,4	6,35
PMSBR	2,14	6,5	6,72

PRODUCCIÓN DEL ASFALTO-CAUCHO EN LA PLANTA PILOTO

La producción a escala real tuvo tres importantes condiciones que cumplir: la dificultad de mantener la temperatura controlada a 163 °C, fijar la energía de agitación en 1800 rpm y hacer la producción en batchadas de 0,21 m³. El proceso de modificación se llevó a cabo a 163 °C, 25 minutos de tiempo de mezclado y 18% en peso del cemento asfáltico total; con estas condiciones se obtuvo una viscosidad de Brookfield dentro del rango de 2000 a 2500 cP. Las propiedades del cemento asfáltico obtenido se registran seguidamente (tabla 4).

Tabla 4
Propiedades del asfalto caucho seleccionado

Característica	Valor
Contenido de caucho (%)	18
Tiempo de mezclado (min)	25
Viscosidad de Brookfield (cP)	2000-2500
T de falla en DSR (°C) G*/sen δ ≥ 1 kPa, AASTHO TP5	74-76
T de falla RTFO residuo en DSR (°C)G*/sen δ ≥ 2,2 kPa AASTHO TP5 - ASTM D2872	65-70
T falla PAV en el DSR (°C) G* sen δ ≤ 5 MPa AASTHO TP5 - ASTM PS 36	16 - 16,5

Características de la pista de prueba

El tramo de prueba se escogió considerando que se garantizara el mismo volumen de tráfico a lo largo de las secciones y condiciones homogéneas de soporte. La

longitud del tramo de prueba es de 270 m (54 m para cada tipo de mezcla), sobre los cuales se realizó una completa caracterización de los granulares y subrasantes existentes. La pista se dividió en cinco secciones con la misma estructura de pavimento en granulares y el mismo espesor de carpeta asfáltica, variando para cada sección el cemento asfáltico. El tramo de prueba está compuesto por un tramo con mezcla asfáltica convencional, dos tramos con mezclas modificadas con desechos de llantas por vía seca y vía húmeda, respectivamente, y dos secciones con asfalto modificado con polímeros SBS y SBR.

Construcción del tramo de prueba

La estructura de cada sección está compuesta por un espesor de granulares variables entre 0,25 y 0,30 m, sobre los cuales se colocó una base estabilizada de RAP (*reclaimed asphalt pavement*) que consistió en la mezcla de los granulares existentes con el RAP obtenido del tramo de prueba, en un espesor de 0,10 m. Sobre la base estabilizada se pusieron 0,07 m de espesor de mezcla asfáltica para cada tipo de cemento asfáltico. Para la construcción de los tramos con asfalto modificado con GC se utilizaron sólo compactadores de cilindro metálico, como recomiendan las especificaciones en la bibliografía existente (Caltrans, 2003). Es importante mencionar que con el diseño y construcción del tramo se esperaba observar su deterioro durante un año, es decir, el tramo se diseñó para una vida útil estimada de un año con las condiciones de tráfico que hay en el corredor.

SEGUIMIENTO DEL TRAMO DE PRUEBA

El desempeño del tramo de prueba se estudió en una primera etapa a lo largo de un año. Durante ese primer año se tomaron medidas para establecer la evolución de las posibles fallas y deterioros que se pudieran presentar en cada sección, determinación de volúmenes de tráfico, medidas de rugosidad (IRI), deflexiones estáticas y extracciones de núcleos para verificación de reología de los cementos asfálticos, mediciones hechas cada tres meses durante el primer año. Así mismo, se buscaba verificar a escala real los resultados obtenidos a partir de estudios efectuados en laboratorio, consistentes en comportamiento reológico de los asfaltos-caucho y el

comportamiento mecánico de las mezclas elaboradas con asfalto-caucho (IDU, 2002; IDU, 2005).

En la actualidad, el tramo de prueba ha alcanzado cuatro años de servicio. El propósito de este artículo es mostrar los resultados obtenidos de las evaluaciones de estado hechas cuatro años después de construido el tramo de prueba. Para este seguimiento se ejecutaron inventarios de fallas, caracterización estructural a través de un FWD y georradar (GPR). Según las mediciones de tráfico, el tramo de prueba ha tenido un tráfico en ejes equivalentes de 80 kN cercano a 4×10^6 . Como resultado de las condiciones de tráfico antes descritas, las secciones han mostrado una variedad de tipologías de fallas, tales como piel de cocodrilo, fisuramiento en bloque, baches y fisuras longitudinales y transversales. A continuación se presenta la evolución de la densidad de fisuración (figura 1). El tramo con AM80100 muestra el más alto grado de fisuración con respecto a los otros tramos, como es de esperarse. Las mezclas ARW80100 y PMSBS registraron un excelente desempeño mostrando densidades de fisuración por debajo del 10%, en contraste con ARW80100 y PMSBS; la sección con mezcla PMSBR mostró un aceptable desempeño, con una densidad de fisuración cercana al 20%.

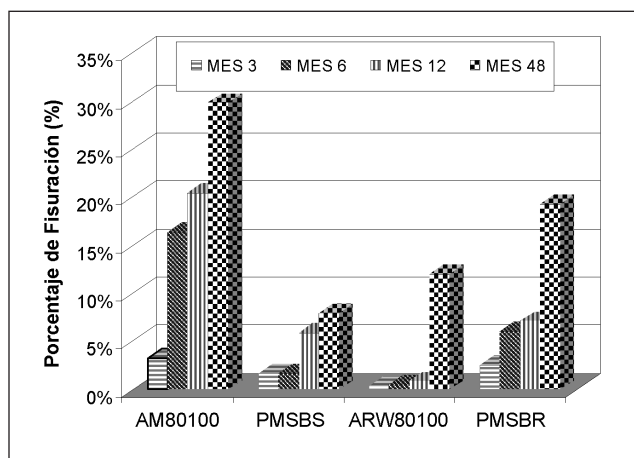


Figura 1. Densidad de fisuración después de cuatro años de servicio.



Figura 2. Estado superficial tramo AM80100.



Figura 3. Estado superficial tramo PMSBS.



Figura 4. Estado superficial tramo ARW80100.



Figura 5. Estado superficial tramo PMSBR.

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL TRAMO DE PRUEBA

Se hizo una evaluación estructural a lo largo de cada tramo de prueba por medio de un FWD. Las medidas se tomaron cada 10 por sección, aplicando una carga normalizada de 40 kN a 20 °C. De la misma manera se usó un GPR para establecer el espesor real de la estructura del pavimento y de cada capa. Analizando los resultados obtenidos a partir del FWD y del GPR, y aplicando el método Rohde (Rohde, 1994), fue posible un análisis de retrocálculo, que permite dilucidar las propiedades mecánicas del paquete estructural para cada tramo.

El método de Rohde utiliza el Índice Estructural del Pavimento (SIP, por su sigla en inglés), el cual representa la cantidad de deflexión que ocurrió dentro de la estructura del pavimento:

$$SIP = D_0 - D_{1,5Hp} \quad (1)$$

Donde:

SIP = Índice Estructural del Pavimento.

D_0 = deflexión pico medida con una carga estándar de 40 kN FWD.

$D_{1,5Hp}$ = deflexión medida a una distancia de 1,5 Hp, con una carga estándar de 40 kN FWD.

H_p = espesor total del pavimento.

El número estructural del pavimento se puede calcular con el espesor completo del pavimento y el valor SIP. Para ello se utiliza la función (2):

$$SN = k_1 \times SIP^{k_2} \times H_p^{k_3} \quad (2)$$

Donde:

SN = número estructural.

SIP = Índice Estructural del Pavimento.

k_1, k_2, k_3 = coeficiente de regresión (tabla 5).

Tabla 5
Coeficientes para la ecuación de SN

Surface Type	k1	k2	K3
Surface Seals	0,1165	-0,3248	0,8241
Asphalt Concrete	0,4728	-0,4810	0,7581

Los resultados de la evaluación con GPR se presentan en la figura siguiente (figura 6). Como ya se mencionó, cada sección estaba compuesta de 0,07 m

de carpeta asfáltica, una base granular estabilizada con RAP de 0,10 m de espesor y una capa de granulares existentes de espesor variable entre 0,2 y 0,6 m.

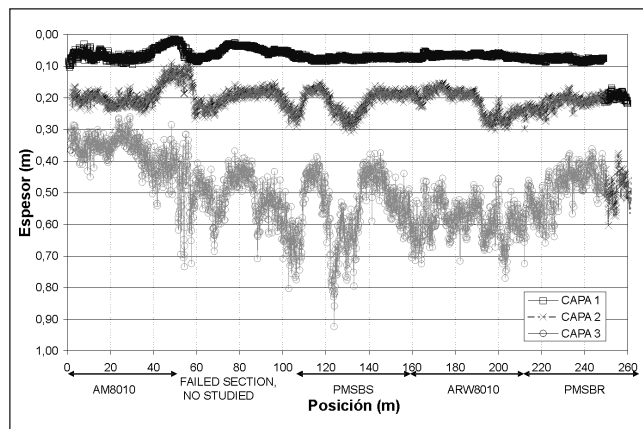


Figura 6. Perfil de espesores medidos por el GPR.

La deflexión pico medida debajo de un plato de carga del FWD es una combinación de la deflexión en la subrasante y de la compresión elástica de la estructura (Zhang et ál., 2003). En la tabla 6 se muestra la deflexión promedio normalizada a 20 °C, medida justo debajo del plato de carga para cada tramo de prueba. Allí se pueden observar tanto la capacidad como la variabilidad de las mediciones en cada sección. Al analizar el PMSBR se aprecia una gran variabilidad (desviación estándar de 438 mm/1000) a lo largo del tramo y la deflexión promedio más alta (1277 mm/1000). Por otro lado, el tramo con ARW8010 experimentó la segunda mayor deflexión promedio, denotando valores uniformes en todo el tramo (desviación estándar 30 mm/1000). En cambio, el tramo con mezcla PMSBS mostró el mejor comportamiento al experimentar la deflexión promedio más baja en relación con los otros tramos en estudio.

Tabla 6
Deflexión promedio

Tramo	Deflexión*	
	Media (mm/1000)	Desviación estándar
AM80100	1031	448
PMSBS	833	153
ARW80100	1243	30
PMSBR	1277	438

* Deflexiones tomadas cada 10 m, a lo largo de cada tramo de 54 m de longitud.

El número estructural se calculó considerando los resultados del FWD y el GPR, y aplicando estos resultados en las ecuaciones (1) y (2) (Rohde, 1994). En la figura 7 se muestran los valores de SN obtenidos por retrocálculo utilizando el método de Rohde para cada tramo. Como se puede notar, el tramo PMSBS presenta el más alto número estructural, seguido en magnitud por el tramo ARW80100; el más bajo número estructural, como debería esperarse, es experimentado por AM80100; es decir, la mezcla convencional. Los tramos con mezcla PMSBS, ARW80100 y PMSBR son asfaltos modificados, unos con polímeros y con grano de caucho provenientes de llantas. Mediante el proceso de modificación se puede mejorar la vulnerabilidad a la temperatura por aumento en la rigidez del ligante a altas temperaturas de servicio y reduciendo ésta a muy bajas temperaturas (Airey, 2004). Las mezclas asfálticas modificadas colocadas en la pista de prueba (PMSBS, ARW80100 y PMSBR) son mezclas más rígidas, debido a la contribución del asfalto modificado junto a la contribución del esqueleto granular, que para el caso del tramo de prueba es el mismo (Martínez et ál., 2006). Por tanto, es esperable que los tramos con asfaltos modificados exhiban mayores SN en condiciones de soporte homogéneas. Es importante mencionar, respecto a los perfiles mostrados por el GPR en la figura 5, que AM80100 contaba con la capa más baja de granulares remanentes.

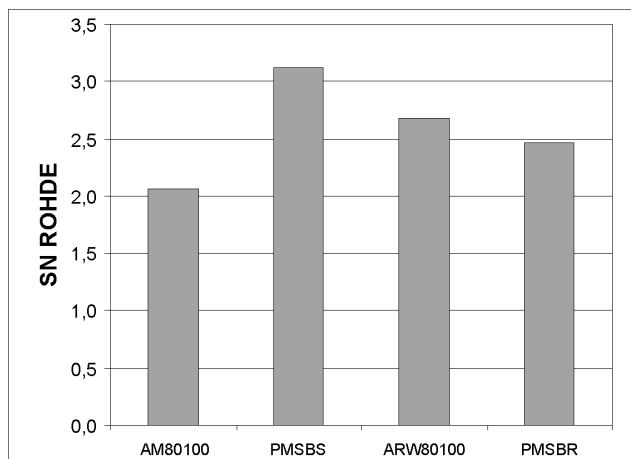


Figura 7. Número estructural obtenido por deflexiones en el centro del plato de carga de un FWD.

En este punto es posible relacionar densidad de fisuración con resultados de FWD y GPR para entender el desempeño de los tramos de prueba. Como se analizó en la figura 1, los sectores con PMSBS y ARW80100 muestran los porcentajes más bajos de fisuración. Sin embargo, las deflexiones del sector ARW80100 fueron mucho mayores que las presentadas en los tramos PMSBS e incluso AM80100. Esto es una evidencia del superior desempeño de las mezclas con asfalto-caucho y su mayor resistencia a la fisuración por fatiga, confirmando que el asfalto-caucho puede tolerar significativamente deflexiones más altas (Kirk, 2006).

Al analizar la fisuración debida a la fatiga, el sistema de especificación de SuperPave requiere el parámetro de fatiga para reflejar la energía disipada por ciclo de carga, la cual puede calcularse como $G \times \text{sen } \delta$ (Anderson y Kennedy, 2003). Dicho parámetro indica una relación donde una reducción en el factor $G \times \text{sen } \delta$ a 10 rad/s corresponde a un mejoramiento en cuanto a la resistencia a la fatiga. Teniendo en cuenta que el porcentaje de fisuración por tramo es una señal directa de agotamiento por fatiga, el parámetro de fatiga propuesto dentro del protocolo de SuperPave para cada cemento asfáltico utilizado dentro del tramo de prueba se relacionó con el fin de establecer la dependencia de la fisuración por fatiga por tramo con el cemento asfáltico aplicado. Los resultados del parámetro $G \times \text{sen } \delta$ se obtuvieron de muestras envejecidas en laboratorio a través del horno de película rotatoria (RTFO) y muestras envejecidas en el recipiente de envejecimiento a presión de Vessel (PAV). De acuerdo con el protocolo SuperPave, este procedimiento puede simular en el cemento asfáltico condiciones de envejecimiento similares a las de una mezcla asfáltica con un tiempo de servicio de entre tres y cinco años. En la figura 8 se compara el parámetro de fatiga $G \times \text{sen } \delta$ a 28 °C de cada cemento asfáltico luego de los procedimientos RTFO+ PAV. La mezcla ARW80100 muestra el mejor desempeño por resistencia a fatiga, además de que se observa una enorme reducción (60%) con respecto al cemento asfáltico base (convencional); este hecho confirma el notable mejoramiento obtenido con la utilización del grano de caucho como agente modificador de ligantes. Los resultados de la caracterización reológica para cemento asfáltico utilizado dentro del tramo de prueba se pueden consultar en Martínez et ál., 2006. Como se puede observar en la figura 8, el parámetro de fatiga SuperPave ha predicho

un mejor desempeño para el cemento asfáltico utilizado en el tramo ARW80100.

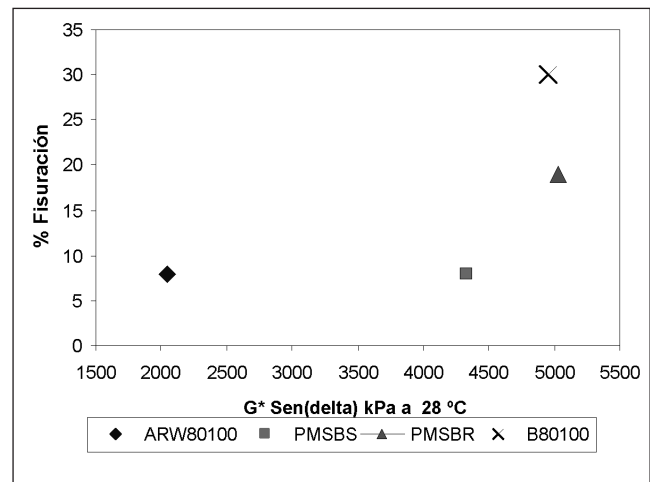


Figura 8. Porcentaje de fisuración por tramo vs. parámetro de fatiga SuperPave.

Respecto a las mezclas modificadas con polímeros, las diferencias en el desempeño basado en propiedades del cemento asfáltico y el desempeño basado en propiedades mecánicas de mezclas asfálticas se pueden relacionar con la interacción físico-química entre el polímero modificado, especialmente la fase polimérica y los agregados minerales dentro de las mezclas asfálticas (Airey, 2003).

CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este artículo ilustran el excelente desempeño del primer tramo de prueba a escala real (tráfico, clima), donde el asfalto modificado con caucho proveniente de llantas desechadas se ha aplicado en Colombia, utilizando el clásico proceso húmedo en un proyecto desarrollado en el año 2004. Uno de los principales objetivos cuando se proyecta un tramo de prueba es observar la evolución de los daños presentados. En el caso de la sección con asfalto-caucho, desde el 2005 estamos esperando que falle el pavimento, y esto no ha ocurrido a la fecha.

Las siguientes conclusiones se pueden obtener del proyecto de investigación:

1. Basado en densidad de fisuración, las mezclas PMSBS y ARW80100 registraron la mejor resistencia a fisuración por fatiga, mientras el tramo con mezcla AM80100 mostró, como se esperaba, el peor desempeño.
2. Una evaluación estructural se llevó a cabo en tramo de prueba utilizando perfiles de deflexiones y espesores reales (FWD y GPR). Deflexiones pico medidas debajo del plato de carga del FWD mostraron que la mezcla ARW80100 presentaba una de las más altas deflexiones, pero el porcentaje de fisuración de esta sección demostró la elevada resistencia a la fisuración de las capas con asfalto-caucho, confirmando de esta manera que las capas con cementos asfálticos con grano de caucho pueden soportar mayores deflexiones que las mezclas convencionales.
3. Por último, se hizo una comparación entre el porcentaje de fisuración y el parámetro de fatiga de SuperPave, verificando la habilidad de $G \times \text{sen } \delta$ para predecir el desempeño a fatiga de cementos asfálticos, cuantificando una gran reducción en este parámetro para el asfalto-caucho respecto a cemento asfáltico convencional o base de modificación.

REFERENCIAS

- Airey, G. (2004). Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials. *The International Journal of Pavement Engineering*, vol. 5 (3), pp. 137-151.
- Anderson, D.A. & Kennedy, T.W. (2003). Development of SHRP binder specification. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist*, 62, 481-507.
- Ballié, M. & Roffé, J. (2000). Low-Noise Asphalt Concrete for wearing course using crumb rubber powder from used tyres. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference*. Vilamoura, Portugal.
- Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, Universidad de los Andes (2002). Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogotá, D.C.
- Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, Universidad de los Andes (2005). Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Pista de prueba contrato 306-03. Bogotá, D.C.
- Kirk, V.J. (2006). Multi-layer Pavement Strategies Utilizing Asphalt Rubber Binder. *Proceedings of the Asphalt Rubber Conference*. Palm Springs.
- Ludomir, U., Maher, M., Balasundaram, A. & Uzarowski, L. (2005). Practical Application of GPR to Supplement Data from FWD for Quick Pavement Performance Prediction. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*. Calgary, Alberta.
- Martínez, G., Caicedo, B., González, D. & Celis, L. (2006). Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts with Crumbed Rubber and others Modifiers. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference*. Palm Springs.
- Martínez, G., Caicedo, B., González, D. & Celis, L. (2006). Rheological Behaviour of Asphalt with Crumbed Rubber and other Modifiers. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference*. Palm Springs.
- Rohde, G.T. (1994). Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. *Transportation Research Record*, N.º 1448. Washington, D.C.
- State of California Department of Transportation- Caltrans (2003). *Asphalt Rubber User Guide*.
- Zhang, Z., Claros, G., Lance, M. & Damjanovic, I. (2003). Evaluation of The Pavement Structural Condition At Network Level Using Falling Weight Deflectometer (FWD) Data. *82nd Annual Meeting of The Transportation Research Board and Publication In The Transportation Research Record Series*.

Coliseo El Otoño: una propuesta arquitectónica a partir de la “divina proporción”

Coliseum El Otoño: an architectural model from the “divine proportion”

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹, STEFANO ANZELLINI², MARÍA INÉS GARCÍA-REYES³

1. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Socio de Anzellini García-Reyes Arquitectos. Profesor de la Universidad de los Andes.

3. Socia de Anzellini García-Reyes Arquitectos.

Recibido: 25/11/2010 Aceptado: 15/12/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El coliseo El Otoño es un trascendental proyecto con el cual la Escuela Colombiana de Ingeniería se propone satisfacer las necesidades culturales, deportivas y recreativas de la comunidad institucional, para fortalecer su desarrollo y contribuir a la formación integral al proporcionar espacios apropiados para llevar a cabo las acciones que se emprendan. En este artículo se presentan los aspectos arquitectónicos más relevantes de la obra —que ha incorporado en su diseño conceptos como la proporción áurea—, en los que se ha hecho una investigación sobre la expresión estructural en la arquitectura en obras realizadas por grandes maestros que han trascendido por la utilización de la tecnología, los materiales, los edificios adaptables y la hechura de enormes cubiertas ligeras.

Palabras claves: conglomerados asfálticos naturales, pavimentos, mezclas asfálticas, asfáltitas, materiales asfálticos no convencionales.

Abstract

The project coliseum El Otoño will serve for the Escuela Colombiana de Ingeniería meets its cultural, sport and leisure needing to improve its development and contribute to the education as a whole by building adequate areas in the institution. In this paper, we describe the most important architectural elements of the project, as golden proportion. This paper researches on structural expression of this element in works of great masters, which have stood out above other ones because of technology, materials, adaptable buildings and huge light coverings.

Keywords: golden proportion, coliseum, metallic structure, beam bridge, bioclimatic architecture.

INTRODUCCIÓN

El Consejo Directivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería, en su sesión de diciembre de 2009, decidió llevar a cabo el diseño y la construcción de un trascendental proyecto: un edificio para las actividades y eventos institucionales, culturales y deportivos, con el propósito de atender las necesidades básicas de la Escuela, fortalecer el desarrollo de la comunidad y asegurar una formación integral de los estudiantes de acuerdo con lo establecido en su Declaración de Principios.

Se trata del coliseo El Otoño, centro cultural y deportivo construido con la prioridad de brindarle a la comunidad un espacio en el que se integren las actividades deportivas y culturales que propugnan el bienestar de todos.

El conjunto del edificio está planteado en tres cuerpos que albergan actividades deportivas, pedagógicas y de bienestar estudiantil, que pueden convertirse en escenarios para actividades culturales. Con la coordinación de la ingeniera Nury Forero, de la Escuela Colombiana de Ingeniería, el diseño arquitectónico lo realizaron los arquitectos Stefano Anzellini y María Inés García-Reyes, de la firma Anzellini García-Reyes Arquitectos; el diseño de la estructura de acero estuvo a cargo de Germán Escobar, de la compañía Acerarq; el diseño de la estructura de concreto lo hizo Pedro Nel Quiroga, de la Escuela Colombiana de Ingeniería; los diseños hidráulicos y sanitarios los efectuó Álvaro Sabbagh y Cía. Ltda.; los diseños eléctricos los realizó Óscar Giraldo y Cía. Ltda.; los diseños acústicos los llevó a cabo el arquitecto Daniel Duplat; los bioclimáticos estuvieron a cargo del arquitecto Mauricio Pinilla; y los de seguridad fueron de Jaime Andrés García; el presupuesto y la programación los realizó la empresa Asinter; todos ellos empresas y profesionales que en su mayoría son egresados de la Escuela.

La gerencia, la interventoría y la construcción de la obra las ejerció directamente la Escuela con el ingeniero Alfonso Rodríguez Díaz, quien contó con la colaboración del arquitecto Andrés Santacruz Reyes e importantes empresas constructoras, como Acerarq, Botero Ibáñez, Propisos, Gamma y Cía. Ltda., M.G. y Cía. Ltda., Álvaro Sabbagh y Cía. Ltda., René Ibáñez, Industrias Leomar, también en su mayoría firmas de egresados de la Escuela.

En este artículo se muestran los aspectos arquitectónicos más relevantes de la obra, en cuyo diseño

se han incorporado conceptos como la proporción áurea; además, se ha hecho una investigación sobre la expresión estructural en la arquitectura en obras realizadas por maestros como Eiffel, Torroja, y contemporáneos como Santiago Calatrava y Renzo Piano, que han trascendido por la utilización de la tecnología, los materiales, los edificios adaptables y la hechura de grandes cubiertas ligeras.

Según los expertos, Calatrava retoma del gótico la sinceridad estructural, diferenciando la estructura del cerramiento para que las fuerzas se transmitan en forma más natural, sustituyendo las estructuras de vigas y pilas, más rígidas, por elementos más eficaces, donde la colocación del material y la aplicación de las fuerzas son esenciales. Renzo Piano establece la tecnología como el punto de partida para sus diseños y la combina de la mejor manera con el carácter arquitectónico, tomando como prioridad satisfacer las necesidades de quien habita lo que se construye. Por su parte, Le Corbusier implementa el sistema de medidas y proporciones que denominó Modulor a partir del legado de la arquitectura clásica y de su regla de oro, la “proporción áurea”, que contribuye a ordenar con rigor armónico las formas arquitectónicas, haciendo uso de las tecnologías de punta de la era industrial.

LA PROPORCIÓN ÁUREA ϕ (FI)

Denominada con la letra griega ϕ (fi) por Mark Barr a comienzos del siglo XX en honor de Fidias y Fibonacci, la proporción áurea fue descrita por Euclides como la división de una línea en dos secciones, de manera que la razón de la medida total es a la parte mayor como la parte mayor es a la menor.

También se representa con la letra griega tau (τ), por ser la primera letra de la raíz griega $\tau\omicron\upsilon\eta$, que significa “acortar”, aunque encontrarla representada con la letra fi (Φ , ϕ) es más común.

De acuerdo con lo anterior, la proporción áurea (ϕ) se define así:

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

Se trata de un número irracional con propiedades interesantes, descubierto en la antigüedad, como relación o proporción entre segmentos de rectas. Esta

proporción se encuentra en algunas figuras geométricas, como cohetes, y en la naturaleza en elementos tales como nervaduras de las hojas de algunos árboles, el grosor de las ramas, el caparazón de un caracol, etc.

Por otra parte, a los objetos que tienen en sus dimensiones la proporción áurea se les atribuye un carácter estético especial y muchas veces una importancia mística. En diferentes documentos se les ha dado importancia a diversas obras de arquitectura y otras artes que han incorporado tal concepto, aunque algunos de estos casos han sido objetables para las matemáticas.

Este concepto sencillo de "proporción perfecta" describe muchos de los patrones formales de diferentes elementos y del crecimiento de los organismos para establecer una especie de "ley del menor esfuerzo". Esta observación, conocida también como la "divina proporción", ha inspirado a pensadores y artistas a lo largo de la historia, y se ha descrito matemática y geoméricamente para simbolizar formas sagradas en la arquitectura y el arte.

Desde la antigüedad, la observación de sistemas de proporciones en la naturaleza inspiró grandes avances en la historia del pensamiento occidental. Pensadores y artistas como Pitágoras, Vitrubio, Fibonacci, Da Vinci, Le Corbusier y otros, estudiaron los sistemas de proporciones y su significado, en busca de fórmulas de armonía que explicaran y permitieran vislumbrar principios unificadores del mundo que nos rodea.

Al profundizar en el estudio de algunas proporciones existentes en la naturaleza, su comprensión mediante principios matemáticos y geoméricos, y su observación e interpretación en el arte, la arquitectura y la ciencia, se conectan las ramas del conocimiento (científico, artístico, filosófico) y se entrecruzan a través de la historia de Occidente. Especialmente en la antigüedad, la ciencia, el arte y la filosofía, e incluso la religión, eran inseparables. Es fascinante observar cómo, a partir de hallazgos sobre las proporciones existentes en la naturaleza, los grandes pensadores de la antigüedad derivaron tanto aplicaciones prácticas en la ciencia, como abstracciones matemáticas y principios de armonía en el arte.

Pitágoras recogió de los egipcios y los babilonios una sabiduría críptica, mantenida en secreto por siglos (los "herméticos"), y la difundió en Grecia, detonando avances inmensos en el conocimiento de las matemáticas, el arte y la concepción del mundo. A partir de él se avanzó en el conocimiento que configuró la cultura

occidental hasta nuestros días.

Los edificios paradigmáticos de la historia de la arquitectura, como el Partenón de Atenas, el Panteón romano, las catedrales de la edad media y los espacios y monumentos del Renacimiento y el barroco, hicieron uso de este sistema de proporciones, que les garantizaba la armonía y el equilibrio tanto estético como estructural. En el siglo XX elaboró, a partir de la proporción áurea, el sistema de medidas Modulor para la arquitectura y el urbanismo. Sobre éste, Einstein comentó: "El Modulor es el sistema de proporciones que permite que lo bueno sea fácil y lo malo, difícil".

Para el caso del coliseo El Otoño, los arquitectos Anzellini y García-Reyes han tenido en cuenta la proporción áurea para dimensionar los espacios y la totalidad del escenario, tal como se muestra en la figura siguiente, en la que se presenta un esquema con el desarrollo de las proporciones de todos los elementos y ambientes que conforman los edificios del coliseo (figura 1).

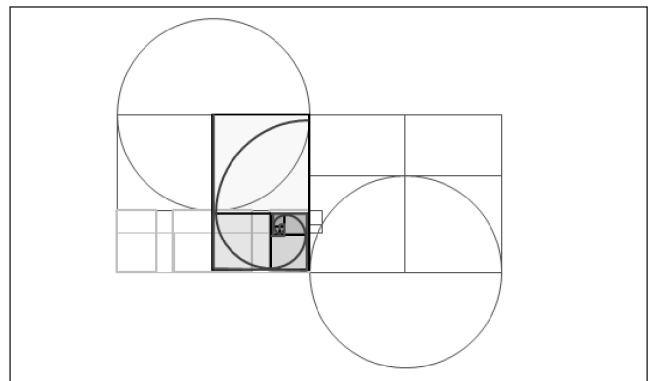


Figura 1. Esquema en el que se muestra el desarrollo de la proporción áurea de los edificios del coliseo El Otoño de la Escuela Colombiana de Ingeniería.



Figura 2. Imagen del plano de la fachada oriental.

Como se describe en el diagrama de composición de las proporciones de la fachada del conjunto, el sistema de medidas se ordena de modo que la relación de las partes entre sí esté en correspondencia con el conjunto como totalidad. El punto de partida es la viga-puente, cuya anchura se encuentra en proporción de 1 a 1,1618 con la altura. A partir de este elemento se despliega la geometría del conjunto, integrando las dimensiones de muros, cubiertas, vigas y columnas, en un sistema geométrico de planos, curvas, líneas y puntos que guardan estricta correspondencia entre sí y a la vez atienden las necesidades funcionales y técnicas: las catenarias de las cubiertas cóncava y convexa, las formas curvas de las columnas, y las aperturas y cerramientos de fachadas (figura 2).

En relación con la cubierta y las formas laterales de la parte central de la edificación, se proyectó una gran estructura metálica sólida que empieza con unas columnas con curvas suaves, que son la finalización de la curva y la contracurva que conforman la cubierta metálica. Las columnas se componen de tres elementos longitudinales curvos de sección cuadrada y los elementos de la cubierta son cerchas tridimensionales con elementos tubulares de sección circular, que sugieren los esquemas propuestos por Santiago Calatrava y Renzo Piano en sus edificios al combinar estructuras innovadoras con un original uso de los materiales.

CARÁCTER DEL COLISEO

Con base en los planteamientos anteriores de los arquitectos y como resultado de la interacción del grupo conformado para el desarrollo del proyecto, se fueron consolidando las ideas. El deseo de hacer un gran coliseo se convirtió en un gran reto para el grupo de trabajo, y prueba de ello es la imaginación desplegada por los arquitectos en la concepción de la obra (figuras 3 y 4).

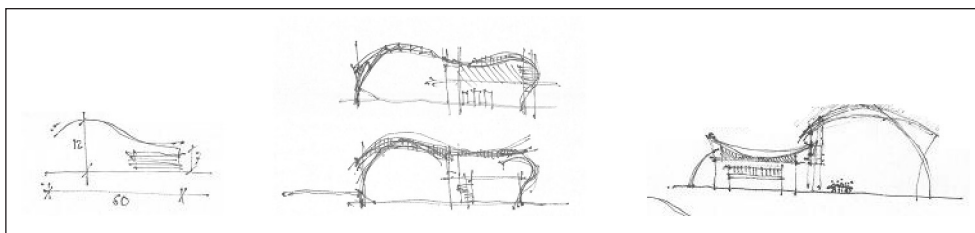


Figura 3. Bosquejos iniciales de la concepción de la obra.

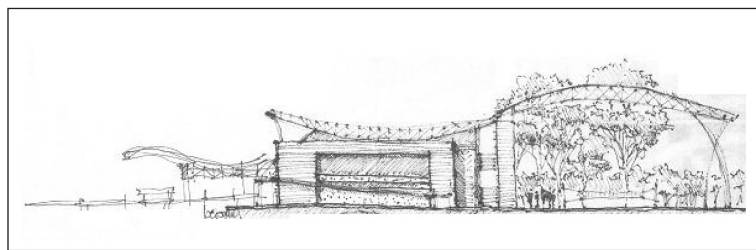


Figura 4. Bosquejo general de la obra.

El conjunto denominado coliseo El Otoño es la celebración de la arquitectura para el deporte y la cultura. Su cubierta central, de curvas armónicas, habla con claridad de la función que cumplirá. Consta del siguiente programa:

- Una nave central de canchas, convertible a centro de eventos culturales, que se ordena en dos zonas: hacia el sur la zona cubierta - cerrada (canchas de baloncesto) y hacia el norte la zona cubierta - abierta (canchas de voleibol y fútbol sala).
- Dos naves laterales, de dos pisos, que flanquean la nave central, y albergan las actividades de soporte deportivas y culturales.
- Viga-puente entre las canchas de baloncesto y las de voleibol. Es el soporte central de la cubierta y a la vez sirve de galería para los espectáculos.
- Cubierta central metálica.
- Cubiertas laterales planas para las naves laterales, útiles como terrazas.
- Estructura metálica de columnas y vigas a la vista en la nave central.
- Estructura de pórticos de hormigón armado en las naves laterales, con fachadas en ladrillo a la vista.

CRITERIOS DE IMPLANTACIÓN

El edificio es la pieza de remate al extremo occidental de la Escuela, que encuadra un conjunto integrado por

la casona de conservación El Otoño, al norte, y la futura biblioteca Gustavo Perry, al oriente.

- Se implanta en el vértice suroccidental del lote "A", adyacente a las canchas deportivas existentes y cercano al lindero occidental del predio, de manera que puede prestar servicios tanto a la comunidad de la Escuela como a la comunidad externa.
- Tiene acceso vehicular y peatonal propio, por la carrera en el lindero occidental de la Escuela. Así se facilita el control del público que acude al coliseo.
- Los lados largos de los volúmenes se orientan en sentido oriente - occidente para lograr máxima captación de luz natural, sin asoleación directa para las canchas de entrenamiento, y con control de la asoleación para las canchas de torneos.

CRITERIOS TÉCNICOS

En el proyecto se coordinan con precisión las variables técnicas relacionadas con la estructura, el sistema constructivo, y con el manejo de la luz, la acústica, el clima, los componentes y los materiales.

La estructura

En la nave central la estructura es metálica, en tubulares cuadrados y redondos, diseñada según una estricta modulación tridimensional. Son cinco grandes pórticos de 64 metros de luz en sentido sur - norte, apoyados en el medio por la viga - puente. La nave central es un recinto que responde de manera estricta a su función de coliseo, en el que confluyen las actividades culturales y deportivas. También expresa el carácter de la Escuela Colombiana de Ingeniería como institución comprometida con la innovación y el rigor técnico y científico. Es un conjunto que permite la flexibilidad de usos y la interacción visual. Su geometría se ordena, tal como se mencionó, a partir de un juego estricto de proporciones armónicas, moduladas según las medidas de la sección áurea (fotografías 1, 2, 3, 4 y 5).



Foto 1. Composición de la estructura metálica. Fachada sur.



Foto 2. Estructura metálica. Sector nororiental.



Foto 3. Viga-puente. Configuración general de la estructura.



Foto 4. Configuración general de la estructura. Todos los elementos metálicos de las columnas y la cubierta se construyeron en el sitio.



Foto 5. Fachada oriental terminada del coliseo El Otoño.

- **Entrepisos.** Son placas de concreto aligeradas, con revestimiento en cemento afinado inferior y superior. Para la cubierta - terraza se han propuesto losetas prefabricadas sobre pequeños distanciadores, que generan una cámara inferior que permite conducir el agua con facilidad hacia las canales laterales. Para los cielorrasos se propone acabado en celulosa lanzada, con el fin de atender los requerimientos de aislamiento acústico. El piso del puente-galería será en madera teca.
- **Pisos.** En la nave central se especifican placas de contrapiso que cumplen con los requerimientos de planicidad y resistencia especiales por sus condiciones de uso deportivo y de exposición a la intemperie.
- **Fachadas.** En los edificios laterales se propone ladrillo tolete cerámico gran formato, color arena a la vista, y en las zonas laterales altas, cortasoles para el control de la luz solar y la brisa.
- **Divisiones interiores.** Se proponen en vidrio y muros en bloque cerámico pañetado, estucado y pintado. Entre los salones de arte del segundo piso del edificio 2 se proponen paneles corredizos para integrar o separar los espacios por módulos.
- **Cubiertas.** En la nave central son dos secciones: en la sección sur, de curva convexa, la cubierta es metálica, tipo “sándwich”; está en la cara inferior de las cerchas metálicas estructurales. En la sección

norte, de curva cóncava, la cubierta se halla en la cara superior de la cercha estructural metálica. Están revestidas en su cara inferior de celulosa lanzada, para un óptimo aislamiento acústico.

CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

El proyecto está basado en el concepto de sostenibilidad, que incluye factores de bioclimática, diseño por sistemas coordinados para su fácil mantenimiento, opción de ahorro energético y de reciclaje.

Bioclimática

La orientación del edificio permite controlar la asoleación natural y garantizar un mínimo consumo de energía para iluminación eléctrica diurna. Los “cortasoles” de las fachadas de los edificios 1 y 2 permiten un adecuado control de la luz solar directa; la disposición de la ventanería, facilita la circulación cruzada de brisa para ventilación natural y evacuación del aire caliente del interior.

Sistema de suministro de agua y redes

Las redes hidráulicas, sanitarias, de gas, eléctricas y de voz y datos estarán a la vista, organizadas en bandejas a lo largo de los corredores de circulación de los edificios 1 y 2, permitiendo su inspección permanente y su adaptación a usos cambiantes.

Reciclaje

El agua se destinará por separado, según su origen (EAAB, pozo profundo o aguas lluvias) a consumo humano, o aseo, y así mismo, el tratamiento de los vertimientos será diferenciado.

Se propone el manejo paisajístico de un humedal artificial (*wetland*) para tratamiento de las aguas servidas del edificio y su reutilización, en el costado sur del conjunto.

Seguridad

El conjunto incorpora los criterios de seguridad, según lo estipulado en el Código de Construcción de Bogotá, las normas NFPA contra incendios, las normas NSR 10 y, en general, las normas de seguridad humana.

CRITERIOS FUNCIONALES

El conjunto se concibe a la manera de un equipamiento polivalente, que combina actividades deportivas y culturales, tanto para la comunidad estudiantil como para la comunidad externa a la Escuela. La zonificación permite una gran flexibilidad para combinar actividades pedagógicas en pequeños recintos, y también actividades sociales y culturales en el gran recinto central ampliado (foto 6).



Foto 6. Vista interior general del coliseo El Otoño. Se observan la imponente nave central y los edificios laterales.

El programa

Se cumplen en estricta forma los requerimientos de los distintos grupos de la Escuela en cuanto a sus intereses particulares, ya sean éstos culturales, pedagógicos o deportivos, en cuanto a espacios, áreas, dimensiones y volúmenes óptimos de los espacios, y según los estándares internacionales de cada actividad.

Zonificación y usos

Se plantea una planta de tres naves y un puente-galería:

- **Nave central.** Altura libre de 7,50 m bajo la viga-puente central. Altura libre mínima de la “cubierta convexa” de las canchas de baloncesto, de 7,50 m. Altura libre mínima de la “cubierta cóncava” de las canchas de voleibol, de 12 m, para dar cumplimiento a la reglamentación internacional de estos deportes. Bajo la viga-puente se disponen paneles divisorios deslizables que permiten total cerramiento o, por el contrario, total apertura de la nave central, lo cual permite transformar el espacio de un recinto cerrado a un recinto abierto e integrado de 64 m por 32 m, útil para los grandes eventos de la Escuela, como las ceremonias de graduación. Se han diseñado graderías retráctiles y móviles, que atiendan la flexibilidad de usos que se plantea: graderías convertibles en tarima para escenario que se ubica en el costado sur de la nave; graderías que se sitúan a los flancos de las canchas principales para torneos; graderías que se disponen al fondo en caso de un gran evento. Estas graderías se corren y se guardan en sus correspondientes depósitos cuando no se requiera su uso.
- **Edificio 1 (nave occidental).** Alberga en el primer piso el gimnasio con sus dependencias de depósito y enfermería, la cancha de squash (de doble altura), su acceso, circulación, escalera y ascensor. También los “bolsillos” de depósito de los paneles divisorios de la nave central. En el segundo piso se ubica el salón de bienestar estudiantil, con sus respectivos servicios de baños y cocina, circulación, escalera y ascensor. En el tercer piso se sale a la terraza, que cuenta con la opción de conexiones perimetrales de energía y voz y datos. También se conecta, por medio del puente, a la nave oriental.
- **Edificio 2 (nave oriental).** Alberga en el primer piso los baños y vestieres, y la oficina de coordinación del equipamiento. También el acceso, la escalera, la circulación y el “bolsillo” de depósito de los paneles de la nave central. En el segundo piso se ubican los salones de arte y ensayos (danza, teatro, etc.), que se dividen modularmente mediante paneles deslizables para integrarlos o separarlos. El corredor de circulación organiza los accesos de la nave y sirve también de palco en los eventos deportivos o culturales organizados en la nave central. En el tercer piso se sale a la terraza, que cuenta con la opción de conexiones perimetrales de energía y voz y datos. También se conecta, mediante el puente, a la nave occidental.
- **Viga-puente.** Es la pieza clave del proyecto. Recoge los accesos oriental y occidental y vincula las circulaciones de los edificios laterales en el tercer piso. Soporta, en la mitad de su recorrido, las vigas prin-

cipales de la cubierta central. En la zona central se sitúa un dispositivo que permite ubicar la consola de controles de iluminación y sonido, para los eventos escénicos (foto 7).



Foto 7. Viga-puente, cuyo diseño y disposición la convierten en pieza clave del coliseo.

Entradas y controles

Se plantean dos “cajas” de acceso: la oriental, vinculada al campus de la Escuela, y la occidental, vinculada al acceso directo desde la carrera.

CONSIDERACIONES FINALES.

La Escuela Colombiana de Ingeniería presenta con orgullo un escenario que sin duda alguna tendrá impacto y ofrecerá grandes servicios a la comunidad de la Escuela y a la sociedad en general. Su belleza y funcionalidad lo hacen singular y único en los aspectos arquitectónicos, estructurales, constructivos, de medio ambiente y funcionales. El equipo de trabajo conformado para proyectar y construir este escenario ha puesto toda su dedicación y empeño para construir una obra con los mejores estándares de calidad, en tiempo récord y con los mínimos costos. Vale la pena apreciarlo y disfrutarlo.



Foto 8. Vista nocturna del coliseo El Otoño.



Foto 9. Zona cubierta abierta del coliseo.



Foto 10. Fachada sur del coliseo El Otoño.

Los morteros asfálticos naturales, Una alternativa ecológica para el mejoramiento de la red vial. De lo empírico a lo técnico

Inglés

JORGE JAVIER PEÑA CAICEDO
Ingeniero Civil, Universidad del Cauca
jorpeca@unicauca.edu.co, 2peca@gmail.com

Recibido: 10/05/2010 Aceptado: 20/06/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En Colombia existen formaciones geológicas que incluyen mantos de gravas y arenas que en algún momento de la historia del planeta se impregnaron de crudos de petróleo, los cuales trataron de salir a la superficie por presión, dejando yacimientos de mezclas asfálticas naturales consideradas como Materiales Pétreos Impregnados con Asfalto, nombre que abarca dos grandes grupos como son los Conglomerados Asfálticos Naturales como los encontrados en la Mina San Pedro en el departamento del Tolima y los Morteros Asfálticos Naturales de las minas que existen en los departamentos de Caquetá y Caldas entre otros. Estos materiales tienen contenidos variables de asfalto de buena calidad para la pavimentación de calles y carreteras y su proporción al igual que la granulometría es variable pero que permiten su mezcla con otros agregados para lograr una eficiente fórmula de trabajo, aplicando la tecnología de las Mezclas en frío para asfaltos líquidos.

Abstract

In Colombia there are geologic formations that include beds of sand and gravel that sometime in the planet's history is impregnated with crude oil, which tried to escape to the surface by pressure, leaving deposits of natural asphalt impregnated stone materials considered with asphalt, a name that covers two large groups such as Natural Asphalt conglomerates such as those found in the Mina San Pedro in the department of Tolima and Natural Asphalt Mortars mines that exist in the departments of Caquetá, Caldas and others. These materials have variable content quality asphalt for paving roads and streets and their proportion as the particle size is variable but allow blending with other aggregates to achieve efficient work formulated by applying technology mixes cold for liquid asphalt.

1. ANTECEDENTES

Desde 1974 se conocen estudios sobre los Morteros Asfálticos Naturales, como es el caso del trabajo titulado “Asfaltos Naturales, su ocurrencia, propiedades y usos en construcción de carreteras en Colombia”, de los investigadores Dowling, Franco y Russell, quienes estudiaron tres fuentes o minas de las catorce que existen en el departamento de Caquetá, concluyendo que estos Morteros Asfálticos Naturales son mezclas asfálticas que contienen un ligante de buenas características para pavimentación y que se pueden usar mezclándolos en frío o en caliente con otros agregados para ajustar las fórmulas de trabajo o en la estabilización de los mismos para su aplicación en carreteras. Después ocurren otras investigaciones tratando de redescubrir sus bondades al revisar el comportamiento de carreteras y calles urbanas en el área de influencia de las minas de este material asfáltico en los departamentos de Caquetá, Caldas, Boyacá, Arauca entre otros.

2. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN

Normalmente se habla de ASFALTTAS para referirse a estos materiales, cometiéndose un error, pues la Asfaltita es un compuesto de hidrocarburos predominantemente aromáticos de alto peso molecular y estructura compleja, de color negro brillante, que *actúa como agente reforzante interno para asfaltos*, mejorando la estabilidad y resistencia de las mezclas, reduciendo la susceptibilidad térmica y el descubrimiento por la acción deteriorante del agua, lográndose así pavimentos más duraderos a bajo costo, es decir un aditivo natural para mejorar el comportamiento del asfalto.

Las Asfaltitas se clasifican en Gilsonita, Grahamita o Pez Lustrosa, en donde la Gilsonita, cuya característica más importante es su Punto de Ablandamiento, es usada en lodos base-aceite, como un reductor de filtrado, siendo un hidrocarburo, se humecta naturalmente por el aceite, en lodos base agua se utiliza como un estabilizador de cortes.

Como un hidrocarburo en polvo se puede unir al agua usando un glicol o un humectante similar. La Grahamita a diferencia de la gilsonita y pez lustrosa, tiene un contenido mas alto de carbono fijo y en que se hincha pero no se funde cuando se calienta, la coloración es mas negra que la gilsonita y la pez lustrosa que es una asfaltita intermedia entre la gilsonita y la

grahamita, tiene un peso específico mas elevado y un punto de fusión mas alto. Se funde con mas dificultad, es menos soluble en nafta de petróleo, sin embargo su solubilidad en sulfuro de carbono pasa del 95%, *se usa para la fabricación de barnices y lacas por su lustre y su intenso color negro*. Estos materiales son muy diferentes a las Asfaltitas, por lo que los llamaremos *Materiales Asfálticos no Convencionales*, pues su conformación es diferente a los materiales asfálticos artificiales o convencionales pero su comportamiento es similar, como son tres grandes grupos que trataremos de identificar así:

1. Crudos pesados, son crudos de petróleo cuya densidad API es superior a 13.5 grados y por lo general contienen mas del 80% de asfalto residual que cumple con las condiciones químicas para ser usado en trabajos de pavimentación. Son líquidos densos, que tienen alto contenido de asfalto y una mezcla natural de solventes volátiles y pesados cuyo comportamiento es el de un asfalto líquido.
2. Conglomerados asfálticos naturales, Son mezclas naturales de gravas arenosas y crudos de petróleo que salio eyectado por presión y contaminó las capas de depósitos de conglomerados pétreos de la superficie.
3. Morteros asfálticos naturales, Como en el caso anterior, son mezclas naturales de arenas y crudos pesados que impregnaron las partículas de areniscas o mantos de arena superficial, convirtiéndose en una mezcla asfáltica que se puede usar en procesos de pavimentación.

En el argot popular se encuentra la palabra “MAPIA”, para referirse a los dos últimos materiales, significando Materiales Pétreos Impregnados con Asfalto, simbología que si bien describe la composición general de los materiales, no identifica su verdadera constitución.

Según el Manual de utilización de emulsiones asfálticas en carreteras Ministerio de Obras Publicas y Transporte de Colombia (1986) se define como *Mortero Asfáltico* “a la mezcla de emulsión asfáltica, agregado fino bien gradado, llenante mineral, agua y aditivo, resultando un producto fluido, homogéneo y cremoso que se extiende como *tratamiento superficial* que una vez evaporada el agua, se adhiere a la superficie, *para impermeabilizar y proveer una superficie antideslizante*”.

Al realizar un paralelo con el Mortero Asfáltico Natural (MOAN), por sus características y comportamiento podríamos decir que es una mezcla *natural* de agregado fino, asfalto, solventes, agua y azufre entre otros minerales, resultando naturalmente un *producto que se extiende como tratamiento superficial, que una vez evaporada el agua y algunos solventes, se adhiere a la superficie, para impermeabilizar y proveer una superficie antideslizante.*

3. INVESTIGACIONES

En el año de 1974 durante el Segundo Simposio Colombiano de Geotecnia e Ingeniería Geológica los investigadores: J. W. L. Dowling, Rodolfo Franco L, R. B. C. Russell, en su trabajo “Asfaltos naturales, su ocurrencia, propiedades y usos en construcción de carreteras en Colombia” revisan las propiedades de los morteros asfálticos naturales de Caquetá, concluyendo que son materiales aptos para el mejoramiento y la pavimentación de carreteras, trabajándolos como mezclas en frío o en caliente, con resultados que no contradicen los encontrados en la investigación que se realizó para este documento.

Años más tarde se cuenta con el trabajo denominado “Los asfaltos naturales en Colombia” de Manuel García López y Jaime Bateman presentado en el Tercer congreso ibero Latino Americano del asfalto. En las Primeras Jornadas Internacionales del Asfalto se presenta el trabajo de Mario García, Nelson Lizarazo y Oscar Reyes un estudio sobre “Asfaltos naturales de Pesca, Beteitiva, Tasco, Tópaga en el departamento de Boyacá” y el “Estudio sobre los asfaltos naturales Colombianos” que investigan Rosalba Fernández, Luis Alejandro Betancur y Alfonso Murgueitio Valencia, presentado en el Décimo Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos.

Para renovar el interés en 2009, en el XVII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos se presenta el trabajo sobre “Los Morteros Asfálticos Naturales de Caquetá, un recurso Asfáltico Aprovechable”

4. LOS MORTEROS ASFÁLTICOS NATURALES (MOAN)

Son materiales naturales compuestos principalmente por arenas, asfalto, solventes, agua y presencia de algunos minerales como el azufre. Las cantidades de los compuestos que intervienen en su conformación

son variables, dependiendo de la formación geológica intervenida por el crudo de petróleo y la posición de la capa. Los morteros asfálticos naturales se encuentran en capas relativamente superficiales de diferente profundidad, las cuales son explotadas con el recurso de una retroexcavadora o un bulldózer, como se puede apreciar en las fotografías 4.1 y 4.2.



Fotografía 4.1 Mina de Pavas – Caquetá.



Fotografía 4.2 MOAN puesto en obra.

Desde hace muchos años estos materiales asfálticos no convencionales se vienen usando para el mejoramiento de carreteras en las zonas aledañas a las fuentes, usando equipos tradicionales y el sentido común, con

buenos resultados y otros pocos fracasos que enseñan a corregir los errores y a minimizarlos, encontrando las siguientes aplicaciones que se pueden constatar en los departamentos de Caquetá, Tolima, Caldas y otros:

- a. Construcción de capas de rodadura
- b. Mantenimiento de pavimentos
 - parcheos
 - sobrecarpetas
- c. Estabilización de capas granulares para bases, sub-bases y afirmados.

Al analizar los morteros asfálticos de las fuentes del departamento de Caquetá, elaborando briquetas marshall y fallándolas a 25 °C, sin proceso de curado, se encontraron los siguientes resultados.

Briquetas compactadas en el laboratorio
75 golpes por cara
Temperatura ambiente 23 °C
Sin curado

Fuentes del Caquetá	Nº	Densidad bulk Gr /cc	Estabilidad Lbs 25 °C	Flujo 0,01 pulg 25 °C
Pavas - Paujil	1	1.763	1.001	40
	2	1.797	988	36
Cuervos – Pto. Rico	3	1.849	761	24
	4	1.860	776	24
Maracaibo Florencia	5	1.635	1319	68
	6	1.673	1341	72

Si bien la deformación es alta (superior a 16/110 de pulgada) las estabilidades son superiores a 750 libras que el Instituto Norteamericano del Asfalto exige para mezclas en frío, valores que aumentan, disminuyendo el Flujo cuando se presenta un proceso de curado, eliminando agua y solventes, como se puede apreciar en el siguiente cuadro en donde se someten las briquetas a 60°C, en un horno, durante 72 horas. Al observar la disminución de la estabilidad cuando el ensayo se realiza a 60 °C, se puede inferir sobre la susceptibilidad térmica pero no se puede desconocer que el contenido de asfalto es alto para la condición de gradación del material, resaltando que para 25 °C, se tiene una estabilidad de 2150 libras y un flujo razonable de 15/100 de pulgada.

BRIQUETAS COMPACTADAS CON 75 GOLPES POR CARA
JULIO 13 DE 2009

Muestra	% asfalto	Densidad Bulk Gr/cc Antes de curado	Densidad Bulk Gr/cc Curado 72 horas a 60°C	Estabilidad Lbs.	Flujo 1/100 pulgadas
1	9.8	2.126	2.124	250* (60°C)	9
2	9.8	2.168	2.166	230* (60°C)	9
3	9.8	2.094	2.092	2150 (25°C)	15

En otro ejercicio se compacta las briquetas con el equipo giratorio aplicando 100 giros, tratando de alcanzar el mismo nivel de densidad bulk, con los resultados que se presentan en la siguiente tabla.

BRIQUETAS COMPACTADAS CON 100 GIROS – COMPACTADOR GIRATORIO
JULIO 12 DE 2009

Muestra	% asfalto	Densidad Bulk Gr/cc Antes de curado	Densidad Bulk Gr/cc Curado 14 horas a 60°C	Estabilidad Lbs.	Flujo 1/100 pulgadas
1	9.8	2.143	2.141	650* (60 °C)	10
2	9.8	2.143	2.141	3650 (25 °C)	17

Julio 22 de 2009

Se puede observar que las densidades bulk no son tan sensibles a los procesos de curado y que los valores de estabilidad y flujo mejoran por efecto del acomodo de partículas debidos al método de compactación usado, teniendo en cuenta que el tiempo en el proceso de curado disminuyo.

Estos resultados alientan el uso técnico de estos materiales y son una prueba fehaciente de los buenos resultados que se observan en las carreteras de segundo y tercer orden y vías urbanas que ostentan duraciones superiores a 7 años.

4.1 Los morteros asfálticos naturales de la mina de Isaza

La mina Isaza está ubicada en el municipio de Norcasia, departamento de Caldas, sirvió de sustento para el man-

tenimiento de la carretera entre La Dorada y Norcasia mientras la construcción de la represa de Hidromiel.

El mortero asfáltico natural de esta mina, esta compuesto principalmente por un 90 % de arena fina, crudo de petróleo, manifestado en un asfalto con solventes livianos y pesados, agua y algunos minerales entre los que se destaca el azufre. Los contenidos de asfalto es variable dependiendo de la profundidad de las capas que se extraen por medio de retroexcavadoras, la gradación de la arena es mas o menos constante y los contenidos de agua en la mina son bajos y constantes, alterándose durante la explotación por efecto del clima y la manipulación del MOAN. En las fotografías 4.1.1 y 4.1.2 se muestra la mina de Isaza y el material extraído.



Fotografía 4.1.1 Mina de Isaza .



Fotografía 4.1.2 MOAN extraído y homogenizado.

La mina produce un material de roca metamórfica, impregnado también de crudo de petróleo oxidado, material que es usado para parcheos en reemplazo de materiales blandos en las subrasantes de las carreteras o como material de afirmado. Ver fotografía 4.1.3



Fotografía 4.1.3 Roca metamórfica impregnada con asfalto.

En el estudio que realiza Corasfaltos sobre el Mortero asfáltico en mayo y junio de 2004, se encuentran que el contenido de asfalto es de 15.36% y que la composición química del asfalto residual en el análisis SARA es la que se presenta en la tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1
Composición química del Asfalto Residual

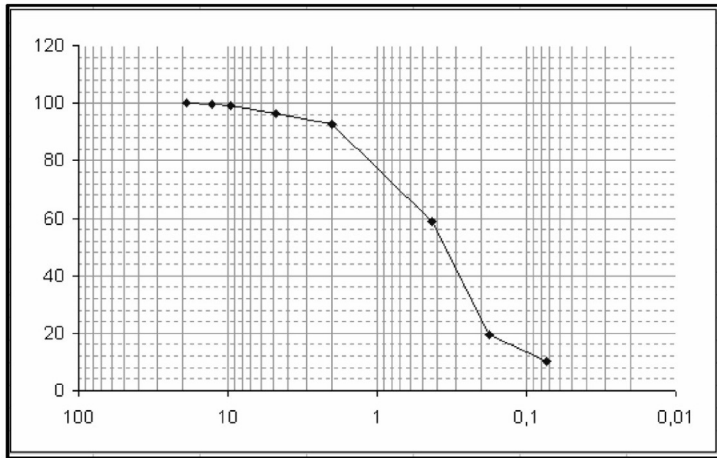
Fracción	Resultado % peso
Saturados	9.86
Aromáticos	29.71
Resinas	51.63
Asfáltenos	8.79
IC	0.23

Fuente: Estudio de Corasfaltos.

En el mismo estudio, Corasfaltos, determina el grado de desempeño del asfalto residual entre 52 -16, lo cual lo hace apto para un rango de temperaturas desde -16 a 52 °C. Estos resultados demuestran el porque del buen comportamiento de las mezclas colocadas en proyectos de hace mas de 7 años.

El mortero asfáltico natural de la mina de Isaza, presenta las siguientes condiciones de gradación (ver grafico 4.1) para un contenido de asfalto de 10.5 % referido a la mezcla, que si se calcula por el método

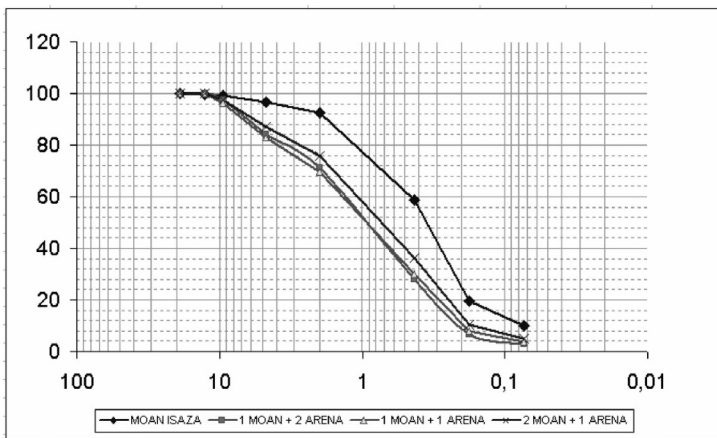
de Duriez, con un $k = 3.5$, su requerimiento de asfalto tendría un exceso de 4.81 %, aclarando que la prueba de extracción se realizó después de curar la muestra a 60 °C en horno durante 24 horas, para eliminar los solventes volátiles y el agua.



Tamiz	3/4	1/2	3/8	N° 4	N° 10	N° 40	N° 80	N° 200
% Pasa	100	99.4	99	96.5	92.5	58.7	19.5	10

Gráfico 4.1 Granulometría del Mortero Asfáltico Natural de la mina de Isaza.

Es evidente que este mortero necesita mezclarlo con otro agregado para equilibrar su fórmula de recubrimiento asfáltico, para lo cual se sugieren tres mezclas en volumen con arena gruesa de la región, las cuales se presentan en el gráfico 4.2 y tabla 4.1.



	Tamiz	3/4	1/2	3/8	N° 4	N° 10	N° 40	N° 80	N° 200
Arena	% Pasa	100	100	96.3	76.9	57	22	11	1.2
Mezcla 1x2	% pasa	100	100	97.3	84.2	71.2	28.1	6.7	3
Mezcla 1x1	% pasa	100	100	96.3	82.9	69.4	30.2	8.1	3.9
Mezcla 2x1	% pasa	100	100	97.5	87.1	75.8	36.4	10.6	5

Gráfico 4.2 Granulometrías de las mezclas en volumen de Moan con arena gruesa.

Estas mezclas se realizan precalentando el MOAN a 60 y 70 °C para diseminarlo, mezclándolo con la arena seca, para compactar las briquetas marshall a temperatura ambiente (cerca de 20 °C), para luego ensayarlas a Estabilidad y Flujo a una temperatura de 25 °C, usando un horno por 30 minutos, para tratar de predecir su comportamiento en obra. En la tabla 4.1 se presentan los resultados de las pruebas descritas.

Tabla 4.1
Resultados de las pruebas Marshall sobre las mezclas de MOAN con ARENA

ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES MEZCLAS DE MOAN CON ARENA				
	MOAN	Mezcla 1:2	Mezcla 1:1	Mezcla 2:1
GRADACIONES				
Tamiz	% pasa	% pasa	% pasa	% pasa
1/2"	100.0	100	100	100
3/8"	98.1	97,3	96,3	97,3
N° 4	93.5	84,2	82,9	84,2
N° 10	89.9	71,2	69,4	71,2
N° 40	60.9	28,1	30,2	28,1
N° 80	32.7	6,7	8,1	6,7
N° 200	13.3	3	3,9	3
CARACTERÍSTICAS MARSHALL				
% Asfalto residual	10.5	2.7	4.1	6.3
Estabilidad, Libras		255	625	660
Flujo, 0.01 pulgadas		11	8	14
Densidad Bulk gr/cc		1.917	1.905	1.833
Grado de cubrimiento	Excesivo	Deficiente	Deficiente	Bueno

En esta tabla se puede examinar el comportamiento de las diferentes mezclas, visualizando la mezcla formada por 2 volúmenes de MOAN y 1 de arena, como la mezcla de mejor comportamiento y cubrimiento.

Para revisar el comportamiento de esta mezcla con la humedad se recurre al ensayo de Inmersión – Compresión para mezclas en frío, obteniéndose los resultados de la tabla 4.2, los cuales brindan confianza sobre la efectividad de la mezcla propuesta, pues son mayores a los exigidos por norma, entregando un Índice de Resistencia Conservada mayor a 75 %.

Tabla 4.2
Resultados del ensayo de Inmersión - Compresión

Muestra	Densidad Bulk, gr/cc	Estado	Resistencia a la compresión kg./cm ²	Índice de Resistencia Conservada %
1	2.090	Seco	36.16 > 25	92.3 > 75
2	2.113	Húmedo	33.39 > 20	



Fotografía 4.1.4 Muestras del ensayo de Inmersión - Compresión.

De esta forma se establece una formula de trabajo para los proyectos de mejoramiento y mantenimiento en el departamento de Caldas, proyectos que son liderados con mucho acierto por la Secretaría de Infraestructura de la Gobernación. La fórmula de trabajo constaría de los siguientes parámetros:

- a) Proporción de mezcla de MOAN con arena.
- b) Dosificación de asfalto residual que depende de la gradación de los agregados mezclados.
- c) Densidad Bulk, lograda en obra y referenciada con la densidad bulk de tres briquetas compactadas con la mezcla de obra, teniendo como requisito lograr el 95% de esta.
- d) Estabilidad mínima, dada por las briquetas y que en este caso específico debe ser mayor a 660 libras a 25 °C.
- e) Flujo, establecido en un rango entre 8 a 16 centésimas de pulgada, esperando que en obra este flujo sea mayor y que en la evolución del curado encaje dentro del rango.
- f) Vacíos en la mezcla, que deben ser un poco mayores a los obtenidos en el laboratorio para permitir la salida de los solventes en el proceso de curado. En

este caso específico si en el laboratorio se logran vacíos del orden de 20 %, se puede contemplar este valor como referencia.

5. PROCESO DE APLICACIÓN DE LOS MORTEROS ASFÁLTICOS NATURALES

Para la manipulación y aplicación de este recurso natural, se sigue el procedimiento que a continuación se resume.

- 5.1 **Explotación del material en la mina** en forma de capas para conservar homogeneidad de características del MOAN, mediante la acción de retro excavadoras y almacenamiento en diferentes depósitos los cuales deben ser analizados, mediante ensayos de laboratorio como Extracción y determinación de la humedad.



Fotografía 5.1 Depósito de MOAN extraído.

- 5.2 **Ajuste de formula de trabajo**, con base en las gradaciones de los materiales a mezclar y usando el método de superficie específica de Duriez, con un coeficiente de cubrimiento K igual a 3.5, se

realiza un ajuste de proporciones de tal forma que se compense en la mezcla los requerimientos de asfalto de cada agregado. Con esta proporción se elaboran varias mezclas para ensayarlas utilizando el método Marshall para asfaltos líquidos propuesto por el Instituto Norteamericano del Asfalto, teniendo en cuenta que la mezcla se realiza a una temperatura tal que se pueda disgregar el MOAN (60 – 100 °C), con los agregados adicionales secos hasta lograr el cubrimiento de las partículas. Una vez realizadas las mezclas se compactan a esa temperatura y se proceden a preparar para las pruebas de Estabilidad y Flujo a 25 °C, calentándolas en horno, durante 30 minutos. Es preciso llevar las briquetas a curado, que consiste en someterlas a una temperatura de 60 °C durante 12 a 72 horas o hasta peso constante, sin embargo la norma establece que se permita curar las mezclas hasta que pierdan el 25 % de solventes, si la mezcla es para mantenimiento y hasta un 50 % si la mezcla se destina para pavimentación. No esta por demás verificar con el ensayo de Inmersión – Compresión la formula que se acoja, bajo los lineamientos de la Prueba Marshall para mezclas en frío con asfaltos líquidos.

5.3 Mezclado del MOAN con otros agregados para ajustar la formula de trabajo, usando dos procedimientos clásicos, bien en patio con Moto niveladora o en planta. En la primera alternativa se tiene la dificultad que el MOAN no se disgrega fácilmente lo que obliga a cambiar de equipo a un cargador, el cual presiona la capa e induce la mezcla, disgregando los terrones de MOAN, tal como se observa en la fotografía 5.3.1., mientras manualmente se recogen los sobre tamaños.



Fotografías 5.3.1 Patio de mezclas con cargador en la Dorada.

5.4 Transporte de la mezcla, se realiza en volquetas siguiendo los mismos lineamientos del transporte de mezclas asfálticas, con la ventaja que este material no se enfría, ni se rompe, permitiendo largos tiempos de transito.

5.5 Extendido de la mezcla, se puede realizar con moto niveladora o con finisher o terminadora de pavimentos, obteniendo los mejores rendimientos y acabados con el segundo recurso técnico. Ver fotografía 5.5.1.



Fotografía 5.5.1 Extendido con finisher de la mezcla de MOAN.

5.6 Compactación de la mezcla, una vez extendida la mezcla y revisados espesores y tersura de la superficie se procede a la compactación con los equipos convencionales (rodillos lisos y compactares neumáticos, usando el compactador de llantas al final del proceso. En este proceso se debe lograr el 95 % de la densidad bulk de las briquetas marshall de referencia, sin olvidar que no se debe densificar al máximo pues la mezcla necesita liberar solventes y un máximo de 3 % de agua. Ver fotografía 5.6.1.



Fotografía 5.6.1 Compactación de capa de mezcla de MOAN con rodillo liso y compactador neumático.

5.7 Apertura al tráfico. Una mezcla bien elaborada, con un contenido de agua inferior al 3%, responde casi que inmediatamente, sin embargo por prudencia se recomienda dirigir el tráfico en las siguientes 72 horas y controlar las velocidades a 20 km/hora, claro esta que esta recomendación depende de las pendientes de la carretera, del clima y de la magnitud de cargas del transito, sin olvidar el espesor de la capa. La razón de este control es la de permitir el curado de la mezcla una vez puesta en obra.

De esta manera se conciben dos proyectos en el departamento de Caldas, uno el de mejorar la carretera La esperanza – El nevado y el otro el de mejorar la carretera La Dorada - Norcasia, con la particularidad de estar en dos topografías diferentes una a mas de 3700 y la otra a 178 msnm., y climas extremos.

Una vez extendida la mezcla 2x1 de MOAN en mas de 8 kilómetros sobre la capa de material granular en la carretera La Esperanza – El Nevado, se observo un buen comportamiento en los primeros kilómetros y deficiencias en un 20 % del tramo lo que obligo a los contratistas en emplear otras mezclas con contenidos de asfalto mayores. Ver fotografías 5.6.2

Los problemas que se presentaron, como grietas piel de cocodrilo, fisuras longitudinales, asentamientos y abultamientos, fueron originadas principalmente por falta de un sistema de drenaje superficial y de subdrenaje, falta de soporte de la capa granular, situación que se corrigió, construyendo cunetas y filtros longitudinales y reemplazando el material o estabilizándolo con cal. Pero el efecto del clima, casi imponderable y no manejable, por su alta humedad y bajas temperaturas, humectó la mezcla e imposibilitó la densificación adecuada. En las tablas 5.1 y 5.2, se presentan los resultados de laboratorio que se consiguieron sobre núcleos extraídos de la carpeta a los cuales después de recortarlos se les determinó la densidad bulk, la densidad máxima medida por el método de Rice, la Estabilidad y el Flujo a 25 °C.



Fotografías 5.6.2 Mejoramiento de la carretera La Esperanza – El Nevado con MOAN de mina Isaza.

Tabla 5.1
Resultados de densidad bulk y vacíos sobre los núcleos

Nº	Abscisa	% asfalto	Dbulk Gr/cc	Grado de compactación %	% vacíos mezcla
2	5+905	6,89	1,767	96,4	26,5
3	6+000		1,799	98,1	25,2
4	6+300	7,01	1,902	103,8	20,9
5	6+600		1,835	100,1	23,7
6	6+900	6,87	1,867	101,9	22,3
7	6+885		1,881	102,6	21,8
8	7+200	6,68	1,852	101,0	23,0
10	7+800	7,08	1,159	63,2	51,8
11	8+100		1,891	103,2	21,3
12	8+150	6,88	1,887	102,9	21,5
13	8+400		1,865	101,7	22,4
14	8+742	6,31	1,859	101,4	22,6
15	9+600		1,872	102,1	22,1
16	10+100	7,09	1,705	93,0	29,0
17	10+400	6,91	1,726	94,2	28,2
17 ^a	10+402		1,726	94,2	28,2
18	11+000	8,82	1,787	97,5	25,2
19	11+600		1,638	89,4	31,4
20	12+320	6,37	1,801	98,3	24,6
21	12+900		1,633	89,1	31,6
22	13+500	6,67	1,64	89,5	31,3

Nota: Estos núcleos se trabajaron en dos laboratorios, obteniendo datos consistentes.

Al observar los contenidos de asfalto residual, se aprecia una variación que va desde 6.31 % a 8.82 % referido a la mezcla, podría pensarse que las mezclas son ricas en asfalto, sin embargo la gradación usada es mas fina y exige mayor contenido de ligante. Si comparamos las densidades bulk logradas y las comparamos con la densidad que dio el Laboratorio en la muestra de diseño igual a 1.883 gr/cc, establecemos que el grado de compactación varia entre el 63 y 103 %, indicando que los puntos de menor densidad tienen un comportamiento anómalo. Los vacíos se encontraron en un rango entre 21 y 52 %, correspondiendo los mas altos a bajas densidades y por ende a un deficiente comportamiento. En las fotografías 5.6.2, se muestra el trabajo de extracción de núcleos en este tramo.

En la tabla 5.2, se amplia la información de los resultados Marshall sobre los núcleos extraídos en el proyecto.

A excepción de tres puntos, no se cumple con las condiciones de estabilidad de la mezcla, los demás



Fotografías 5.6.3 Toma de núcleos sobre la carpeta de MOAN.

presentan valores superiores a los 660 libras y los flujos están cercanos al rango normalmente aceptado (8 a 16/100 pulgada), nuevamente correspondiendo a un buen comportamiento de la mezcla.

La sospecha del efecto del clima en la construcción y comportamiento de las mezclas con MOAN se rati-

Tabla 5.2
Resultados de los ensayos de Laboratorio sobre los núcleos

PROYECTO LA ESPERANZA - EL NEVADO									
RESULTADOS DEL CONTROL DE CALIDAD DE CARPETA DE MORTERO ASFALTICO DE ISAZA									
Nº	Abscisa	% asfalto	Dbulk Gr/cc	Dmm Gr/cc	% vacíos	Estabilidad libras	Flujo 1/100 pulg	E/F Lbs/pulg	Temperatura °C
2	5+905	6,89	1,767	2,404	26,5	1092,3	16,9	64,63	25
3	6+000		1,799	2,404	25,2				
4	6+300	7,01	1,902	2,404	20,9	1743,72	13,4	130,13	25
5	6+600		1,835	2,404	23,7	1071	10	107,10	25
6	6+900	6,87	1,867	2,404	22,3	1730,1	14,2	121,84	25
7	6+885		1,881	2,404	21,8	1744	17	102,59	25
8	7+200	6,68	1,852	2,404	23,0	873,6	15	58,24	25
10	7+800	7,08	1,159	2,403	51,8	955,5	17,3	55,23	25
11	8+100		1,891	2,403	21,3	1329	16	83,06	25
12	8+150	6,88	1,887	2,403	21,5	1900,8	14,6	130,19	25
13	8+400		1,865	2,403	22,4	1139	16	71,19	25
14	8+742	6,31	1,859	2,403	22,6	1330,3	17,3	76,90	25
15	9+600		1,872	2,403	22,1	811	19	42,68	25
16	10+100	7,09	1,705	2,403	29,0	566,72	17,3	32,76	25
17	10+400	6,91	1,726	2,403	28,2	675,4	14,2	47,56	25
17A	10+402		1,726	2,403	28,2				
18	11+000	8,82	1,787			991,5	15,7	63,15	25
19	11+600		1,638	2,388	31,4	322	29	1,10	25
20	12+320	6,37	1,801	2,388	24,6	830,7	16,5	50,35	25
21	12+900		1,633	2,388	31,6	238	29	8,21	25
22	13+500	6,67	1,64	2,388	31,3	509,1	14,2	35,85	25

fica, por ello la recomendación de trabajar cuando las condiciones de temperatura sean superiores a 5 °C y no haya amenaza o presencia de lluvia, en este como en todos los materiales de construcción que se conocen, es de inevitable aplicación.

Las condiciones de clima y de topografía cambian drásticamente en el proyecto de mejoramiento de la

carretera La Dorada – Norcasia, se realiza en mismo trabajo, usando la mezcla recomendada y los resultados son alentadores y coherentes con el buen funcionamiento del tratamiento, pues, el proyecto consiste en proveer de una carpeta de la mezcla de MOAN, a manera de refuerzo y parchar algunos baches. En las fotografías 5.6.4, se presenta la capa de 5 centímetros de la mezcla



Fotografías 5.6.4 Recubrimiento de 5 centímetros de MOAN, como refuerzo asfáltico.



Fotografías 5.6.5 Extracción de núcleos, nótese el espesor compuesto por las dos capas de MOAN.

colocada sobre una estructura granular protegida por una capa de 5 a 7 centímetros de MOAN antigua, cuya existencia se remonta a mas de 10 años.

En forma similar se extrajeron núcleos de las capas asfálticas de la vía para constatar las condiciones técnicas que se lograron en el proceso de construcción, haciendo relevancia en el efecto del clima con temperaturas superiores a los 30 °C y una humedad relativa por debajo de 50%, condiciones que permiten un mejor proceso

de compactación y una liberación de solventes y agua mas rápida. En las fotografías 5.6.5 se muestran detalles de la extracción de los núcleos.

En la tabla 5.3 se muestran los resultados de las pruebas de laboratorio a que se sometieron las muestras tomadas de la carpeta, observándose que la variación del asfalto residual esta dentro de 6.3% mas una tolerancia de +/- 0.5 %, mostrando una mezcla homogénea y sin mayores variaciones de la gradación usada en el proporcionamiento de los materiales.

Tabla 5.3
Resultados de los ensayos sobre los núcleos extraídos de las capas

PROYECTO LA DORADA - NORCASIA									
RESULTADOS DEL CONTROL DE CALIDAD DE CARPETA DE MORTERO ASFALTICO DE ISAZA									
N°	Abscisa	% asfalto	Dbulk Gr/cc	Dmm Gr/cc	% vacíos	Estabilidad libras	Flujo 1/100 pulg	E/F Lbs/pulg	Temperatura °C
1	9+995		2,04	2,411	15,4	4000	11	363,6	60
1AN	9+995		2,159	2,362	8,6	3942	16	246,4	60
2	9+750	6,4	2,044	2,411	15,2	5896	15,7	375,5	25
3	9+480		1,997	2,411	17,2	591	6	98,5	60
4	8+910	6,63	2,024	2,411	16,1	4743	15,4	308,0	25
5	8+630		2,06	2,411	14,6	522	10	52,2	60
5AN	8+630		1,966	2,362	16,8	1265	9	140,6	60
6A	8+380	6,26	1,96	2,362	17,0	3350,1	14,6	229,5	25
7	8+100		1,993	2,406	17,2	623	6	103,8	60
7AN	8+100		2,06	2,421	14,9	2189	13	168,4	60
8B	7+742	6,46	1,939	2,406	19,4	5594,4	12,6	444,0	25
10	6+410	6,5	2,057	2,406	14,5	3033,1	15	202,2	25
11	5+350		1,927	2,406	19,9	486	9	54,0	60
11AN	5+350		1,901	2,421	21,5	5137	7	733,9	60
12	4+750	6,44	1,804	2,406	25,0	3068,8	15,4	199,3	25
13	4+200		2,004	2,406	16,7	41	9	37,9	60
13	4+200		2,038	2,421	15,8	797	9	88,6	60



Fotografías 6.1 Parcheos de pavimentos con MOAN

Las Densidades bulk van desde 1,804 a 2,159 gr/cc, correspondiendo a grados de compactación superiores al 95.8 %, referidos a la densidad bulk de Laboratorio igual a 1.883, involucrando una variación de los Vacíos en la mezcla entre 8.6 al 25 %, encontrando valores similares tanto en la capa nueva como en la antigua. Las Estabilidades determinadas a 25 °C dieron superiores a 3000 libras, con Flujos entre 12.6/100 y 15.7/100 de pulgada; dados los resultados tan altos de resistencia, se trabajaron a 60 °C, obteniendo estabilidades dentro de un rango de 522 a 5137 libras y flujos entre 6/100 a 16/100 de pulgada, resultados que se envidiarían en una mezcla asfáltica en caliente.

Pese a algunos problemas de homogeneidad en el mezclado de los materiales, el tramo tiene un buen comportamiento, presentando solo en algunas curvas desplazamientos de la mezcla por efecto de la apertura al tránsito sin control.

6. PARCHEOS Y CAPAS GRANULARES ESTABILIZADAS CON MOAN

En el departamento de Caldas y específicamente en el área de influencia de la mina de Isaza, desde hace más de 10 años se trabaja en el parcheo de los baches de pavimentos con gran éxito, consistiendo la tarea en remover las capas afectadas, reemplazándolas con el material de Roca metamorfozada con vestigios de asfalto o mezclada con MOAN, para luego colocar una capa de

la mezcla de MOAN con arena según como se muestra en las fotografías 6.1.

El Mortero Asfáltico Natural de la mina de Isaza también se involucra en agregados gruesos de granulometría densa mediante mezclado en frío, para conseguir materiales granulares estabilizados con asfalto de relativamente fácil manejo y buen comportamiento a costos bajos. Las técnicas de aplicación de las mezclas en frío con asfaltos líquidos siguen vigentes para esta modalidad constructiva. En las fotografías 6.2 se puede apreciar este material puesto en obra.

7. MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS

Desde hace varios años, con intuición y gran observación, se monta una planta de mezcla en caliente para conseguir mezclas similares a las tradicionales pero con MOAN y agregados triturados de gradación densa. El proceso comienza en un premezclado en patio de los materiales, para luego depositarlos en tolvas y pasarlos por un tornillo sin fin, dispositivos de doble pared para la circulación de aceite caliente, con el fin de precalentar los materiales premezclados, tratando de diseminar el MOAN. Así esta mezcla se lleva a un quemador tradicional, en donde se completa la temperatura a más de 120 °C y si no se ha provocado un incendio, pasa al mezclador para obtener una mezcla de MOAN con mejores características y en caliente. En las fotografías 7.1 se muestran imágenes de este proceso.



Fotografías 6.2 Capas de base granular estabilizada con MOAN.

Con el objeto de analizar las condiciones mecánicas de la mezcla en volumen de 2x1 de MOAN y arena, con esta modalidad de Mezclas Tibias, en el Laboratorio se investiga la temperatura ideal para lograr el cubrimiento de los agregados, encontrando que esta temperatura oscila entre 90 y 100 °C, procediéndose a elaborar varias briquetas de 4 y 6 pulgadas de diámetro, manteniendo este rango de Tolvas y canal con tornillo sin fin calientes temperatura en el proceso de compactación giratorio con 200 giros,. Ver Fotografías 7.2.

A las briquetas una vez elaboradas, se les determina sus dimensiones y su peso para conseguir una densidad bulk igual a 2.014 gr/cc para luego llevarlas a curado durante 72 horas a 60 °C, encontrando que la densidad bulk bajo a 2.009 gr/cc, condiciones que considerando una densidad máxima medida igual a 2.445 de la mez-

cla, ofrece un % Vacíos antes de curado igual a 17.6 y después del curado igual a 17.8 %. Como se puede apreciar el efecto del curado en el parámetro de los vacíos y densidades no es significativo. En la tabla 7.1 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos.

Se puede concluir que los valores de Estabilidad se mantienen superiores a 3500 libras, igual que las conseguidas en los proyectos, que el flujo esta dentro del rango sugerido por el Instituto Norteamericano del Asfalto, que la relación Estabilidad – Flujo a 25 °C es superior a 200 y que los vacíos con que puede quedar una mezcla son del orden de 17 %; concluyendo que las practicas de laboratorio empleadas son representativas de los procesos de campo y que se pueden usar para el diseño y control de calidad.



Fotografías 7.1 MOAN premezclado y la Planta para mezcla en caliente.



Fotografías 7.2 Mezcla a 95 °C de MOAN Y ARENA en proporción 2:1 en volumen y briqueta compactada en equipo giratorio con 200 giros.

Estos resultados son alentadores y demuestran que el Mortero Asfáltico Natural se puede trabajar con Mezclas Tibias en planta a 100 °C, obteniendo como ventajas:

- Mejor homogeneidad en la mezcla
- Mejores condiciones mecánicas
- Un proceso de curado mas rápido

8. CONCLUSIONES

Con la información recolectada de los proyectos, la inspección de campo y las pruebas de laboratorio realizadas, se puede concluir que:

- a. Los Morteros Asfálticos Naturales representan a un grupo de materiales asfálticos no convencionales que son viables para el mejoramiento de la red vial.
- b. El Mortero Asfáltico Natural de la mina de Isaza, se puede usar en el mejoramiento y pavimentación de calles y carreteras.
- c. Todos los proyectos deben ser estudiados en forma particular y deben corresponder a diseños de estructuras y procesos específicos.
- d. El parámetro CLIMA, es fundamental en la aplicación de estos materiales asfálticos, recomendando trabajarlos en temperaturas no inferiores a los 5 °C y sin amenaza ni presencia de lluvia.
- e. La humedad de las mezclas debe ser inferior a 3 %, tanto para mezclarlas como para compactarlas.
- f. La tecnología de las mezclas en frío con asfaltos líquidos se puede aplicar para el manejo de los Morteros Asfálticos Naturales.
- g. Las mezclas Tibias son viables y de buen comportamiento con los Materiales asfálticos no convencionales.

BRIQUETA Nº DIAMETRO 4"	Nº GIROS	Dbulk gr/cc Antes curado	Dbulk gr/cc Después curado	ESTABILIDAD LIBRAS 25 °C	FLUJO, 25°C 0.01 pulgadas	E / F	VACIOS MEZCLA % Después curado
1	200	2,009	2,004	3550	9	394.4	18
2	200	2,014	2,009	4375	13	336.5	17,6
3	200	2,014	2,009	4400	15	293.3	17,6
4	200	2,035	2,040	3550	14	253.6	16,8

Obtención de un recubrimiento de cobre sobre un acero de bajo carbono a partir de un desecho industrial

Obtaining a copper coating on a low carbon steel from an industrial waste

WILLIAM APERADOR CHAPARRO^{1,2}, AURA SOFÍA MEJÍA MORALES¹, DIEGO FERNANDO MARTÍNEZ RAMÍREZ³

1. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
2. Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
3. Escuela Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle, Cali, Colombia,

Recibido: 25/11/2010 Aceptado: 17/12/2010
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El cobre se emplea ampliamente en la industria por sus buenas propiedades mecánicas, alta conductividad eléctrica y térmica, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. Sin embargo, durante las operaciones de procesamiento y fabricación del metal se utiliza un método de limpieza conocido como decapado ácido, el cual es responsable de causar pérdida de material por efectos de corrosión. Con el objetivo de darle uso a este tipo de desecho industrial, se realizó la deposición del electrolito producido por el decapado de cobre sobre acero AISI SAE 1020, optimizando el proceso para utilizarlo en las mejores condiciones en la obtención de un recubrimiento de muy buenas propiedades con el propósito de que cumpla con las normas para su aplicación como polos a tierra.

Palabras claves: recubrimientos de cobre, electrolito, propiedades mecánicas.

Abstract

Copper is widely used in industry for its good mechanical properties, Copper is widely used in industry because of its good mechanical properties, high electrical and thermal conductivity, wear and corrosion resistance. A cleaning method known as etching acid is used during processing operations and manufacturing of this metal, which is responsible for loss of material due to the effects of corrosion. This type of industrial waste was made of the electrolyte produced by etching copper on steel AISI SAE 1020, optimizing the process to be used in the best conditions for obtaining good coating properties to comply with the rules for its application as ground poles.

Keywords: copper coating, electrolyte, mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

El cobre y sus aleaciones se utilizan en una gran variedad de sistemas y aplicaciones, tales como equipos industriales: intercambiadores de calor, cojinetes, conectores, transporte, etc., [1-4] aplicaciones basadas en el efecto beneficioso de elevada conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y al desgaste; [5-7] en la industria de la construcción: fontanería, alambres, calefacción, sistemas de aire acondicionado, y en cubiertas y fachadas de edificios; [8-9] electricidad y electrónica: cables de conducción eléctrica, contactos, resistencias y circuitos electrónicos (circuitos impresos, en los que la eliminación selectiva de los óxidos de cobre formados instantáneamente por exposición al aire no está resuelta), embalaje de semiconductores; [10-11] monedas y elementos ornamentales, debido a su excelente resistencia a la corrosión, extraordinaria fundición (por ejemplo, campanas y estatuas) y variedad de colores. Los compuestos de cobre se utilizan también en aplicaciones biomédicas, agricultura, tratamiento de aguas, energía, como en pilas de combustible de óxido sólido, etc.

El decapado en ácido sulfúrico y clorhídrico es el método más habitual para eliminar los óxidos formados sobre los materiales de base cobre durante los procesos de molienda y las operaciones de fabricación. Los ácidos orgánicos, tales como el ácido cítrico, tienen la ventaja sobre los ácidos minerales de ser menos agresivos, más fáciles de manejar, y no representar peligro para la salud y el medio ambiente. Este tipo de decapado es adecuado para eliminar los óxidos de cobre y las manchas (empañamiento) originadas durante la exposición del cobre a la atmósfera, sin atacar el sustrato de cobre [12-14].

La industria del cobre es una actividad productiva generadora de desechos, entre los cuales está el generado en el decapado del cobre, en el que se usa el ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, utilizado con el fin de separar las capas de óxido o las delgadas películas protectoras del metal [15], así como todo compuesto químico adherido en la superficie del cobre, obteniendo después de este procedimiento una solución formada por sulfato de cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) y contaminantes [16]. Aquí se encuentra una oportunidad de generar cobre conociendo las aplicaciones actuales en las cuales se utiliza, dado su alto costo industrial [17-18].

Con el baño obtenido del decapado de cobre se pretende conseguir un recubrimiento de cobre por medio de una técnica llamada electrodeposición, proceso con el que se busca alterar las características superficiales de un material, por lo cual se ha empleado ampliamente para proteger diferentes tipos de piezas de agentes corrosivos, para mejorar su resistencia al desgaste y para obtener superficies metálicas con acabados superficiales específicos [19]. Dentro de la gama de electrorrecubrimientos existentes, el cobre se constituye en uno de los más utilizados para recubrir aceros, debido a su excelente protección contra la corrosión; hoy en día se emplea como primera capa de recubrimiento para aplicaciones decorativas y también para aplicaciones de conducción de electricidad [20].

El propósito de este trabajo es aplicar la tecnología de electrodeposición usando el baño obtenido por el decapado del cobre, generando un recubrimiento de cobre sobre una varilla de acero de bajo carbono para aplicaciones de polo a tierra, que normalmente es una varilla de cobre enterrada en la tierra, sujeta a un cable de cobre que crea una unión directa a tierra, con el propósito de que para todo voltaje que esté en contacto con éste pueda proveer seguridad si se presenta un cortocircuito.

MÉTODOS Y MATERIALES

Se utilizó un tipo de probetas en forma de láminas (acero bajo carbono, AISI 1020), de dimensiones 5 cm \times 5 cm, lo mismo que los dos ánodos, que fueron de plomo.

Tabla 1
Composición del acero utilizado como sustrato

Carbono	Manganeso	Silicio	Fósforo	Sulfuro
0,17	0,05	0,08	0,04	0,04

La composición química se determinó por fluorescencia de rayos X (FRX) de energías dispersivas utilizando un espectrómetro Philips, modelo PW-1480, con ánodo Sc/Mo, una tensión del generador de 80 kV y una corriente de 35 mA. El otro método usado fue el de titulación por precipitación, cuyo propósito fue

determinar la concentración de ácido sulfúrico y sulfato de cobre presente en la solución.

Los ensayos de electrorrecubrimientos se obtuvieron con una fuente de corriente continua con capacidad de 15 amperios y 30 voltios, utilizando tres tipos de corriente 1= 2,5 A/dm²; 2 = 5 A/dm² y 3= 7,5 A/dm²; se realizaron de manera dinámica y se empleó una celda con capacidad de ocho litros. Se usaron como cátodos láminas de acero AISI 1020 y ánodos de plomo. Antes del proceso de cobrizado, los cátodos fueron sometidos a un proceso de limpieza con ultrasonido, seguido de un desengrase electrolítico en un baño Kleanex que se utiliza con el fin de remover del acero –que en este caso es el material que hay que recubrir– todo tipo de suciedad, incluyendo grasas; el tiempo de este proceso fue de diez minutos. Posteriormente se realizó un enjuague con agua destilada y luego un decapado químico, que está compuesto de HCl al 50%, con el propósito de remover todo óxido presente en la superficie del metal; la probeta permaneció en decapado un tiempo de diez minutos, y después del decapado y del enjuague de la probeta se hizo un pretratamiento de la probeta en un baño de cianuro, con el fin de garantizar una buena adherencia del recubrimiento, por un tiempo de quince minutos; por último, se obtuvo el recubrimiento mediante cobrizado. En esta etapa del proceso se lleva la probeta a determinadas condiciones de concentración, densidad de corriente, con el objetivo de alcanzar espesores mayores de 100 µm (espesor indicado en la norma para polos a tierra) [21]; el tiempo de permanencia en el baño fue de 2,5 horas.

Con el propósito de evaluar los detalles morfológicos y los espesores de los recubrimientos obtenidos se utilizó la microscopía electrónica de barrido, en el que se analizan las muestras mediante la interacción de electrones de un haz de luz que barre la superficie; el microscopio electrónico de barrido de alta resolución empleado fue el Philips XL 30 FEG, un detector de rayos X y electrones secundarios de berilio litio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la solución

Para conocer la composición química de la solución de residuo se realizó una fluorescencia de rayos X, la cual arrojó los siguientes resultados:

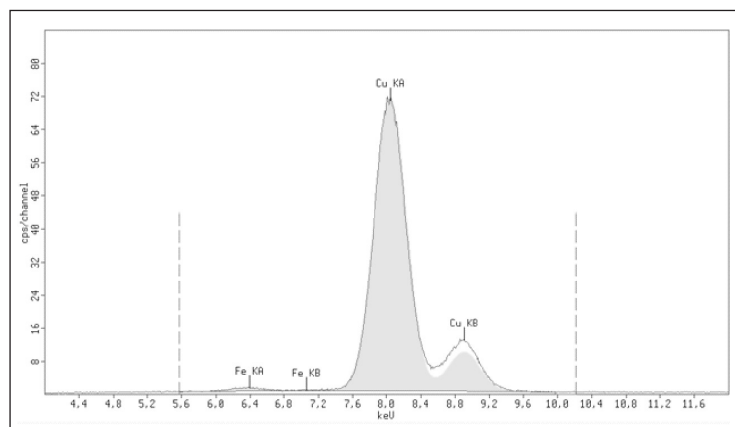


Figura 1. Espectros de composición de la solución de residuo de la empresa Cobres de Colombia.

Se utilizó el método de titulación por precipitación para encontrar la concentración de sulfato de cobre y de ácido sulfúrico de la solución industrial de la empresa Cobres de Colombia. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 2
Características químicas del residuo

pH	Concentración CuSO ₄ (g/l)	Concentración H ₂ SO ₄ (g/l)
0,86	224,91	11,6

El proceso de cobrizado se hizo con rangos de concentración, los cuales eran 200-250 CuSO₄ (g/l) y 60-30 H₂SO₄ (g/l) [22]. Se disminuyó y aumentó la concentración de CuSO₄, por lo que se decidió preparar dos tipos de solución tomando los dos extremos del rango reportado.

Tabla 3
Concentración teórica 1

Concentración CuSO ₄ (g/l)	Concentración H ₂ SO ₄ (g/l)
250	60

Tabla 4
Concentración teórica 2

Concentración CuSO ₄ (g/l)	Concentración H ₂ SO ₄ (g/l)
200	30

Se calcularon las cantidades necesarias para llegar a esas concentraciones a partir de la concentración del residuo. Se usaron 150 ml de la solución original. Para la concentración 1 se adicionaron a la solución original 6,7 ml de H₂SO₄ y 16,26 g de CuSO₄.

Para la concentración 2 se adicionaron a la solución original 3 ml de H₂SO₄ y 9,26 g de CuSO₄.

Estas cantidades son teóricas. Al corroborar titulando las soluciones obtenidas, se consiguió lo reportado en las tablas siguientes (tablas 5 y 6).

Tabla 5
Concentración 1 obtenida

Concentración CuSO ₄ (g/l)	Concentración H ₂ SO ₄ (g/l)
245,94	58,82

Tabla 6
Concentración 2 obtenida

Concentración CuSO ₄ (g/l)	Concentración H ₂ SO ₄ (g/l)
222	33,63

MEDIDA DE ESPESORES

En la figura 2 se observa el valor promedio de los espesores obtenidos con las tres diferentes corrientes; con respecto al baño 1 (CuSO₄ 245,94 g/l y H₂SO₄ 58,82 g/l), el espesor tiende a aumentar a medida que se incrementa la corriente, obteniéndose el mayor espesor promedio cuando se usa la corriente 3 (247,785 μm), mientras que las corrientes 2 y 1 son, en su orden, 170,54 μm y 155,623 μm. Para la concentración 2 (CuSO₄ 222 g/l y H₂SO₄ 33,63g/l) igualmente aumenta, obteniéndose su valor máximo en la corriente 3 (222,055 μm).

Para la medida se analizó el espesor a lo largo de la probeta, borde, medio y extremo, y se obtuvo un promedio; se pudo observar en estas medidas que cuando el espesor se aproximaba al extremo aumentaba, obteniendo diferentes valores; esto ocurre por la profundidad que tiene cada uno respecto a la solución.

Los factores que afectan el espesor son concentración del baño, densidad de corriente y tiempo del proceso. A continuación se observa la manera en la que se tomaron las medidas de espesor y se muestran los resultados del baño 1 con una densidad de corriente de 7,5 A/dm² (figuras 3, 4 y 5).

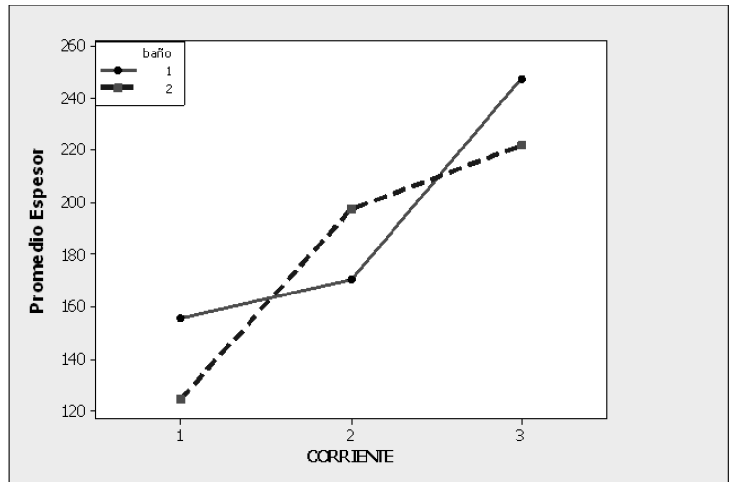


Figura 2. Gráfica de interacción entre la concentración y la corriente.

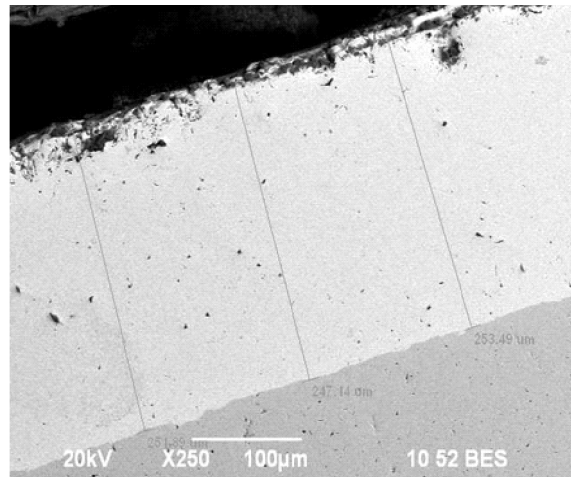


Figura 3. Micrografía del extremo de la probeta, correspondiente a la solución 1 y obtenida con una densidad de corriente de 7,5 A/dm².

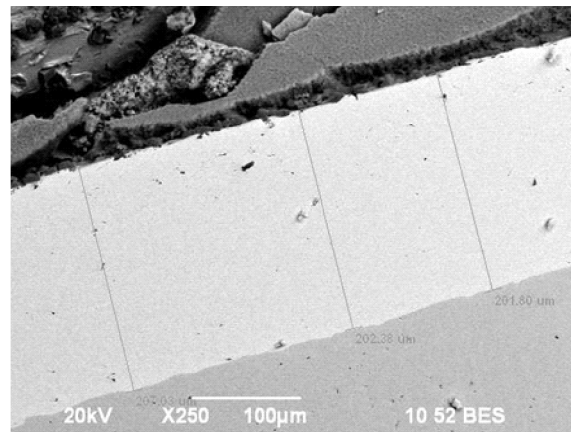


Figura 4. Micrografía del centro de la probeta, correspondiente a la solución 1 y obtenida con una densidad de corriente de 7,5 A/dm².

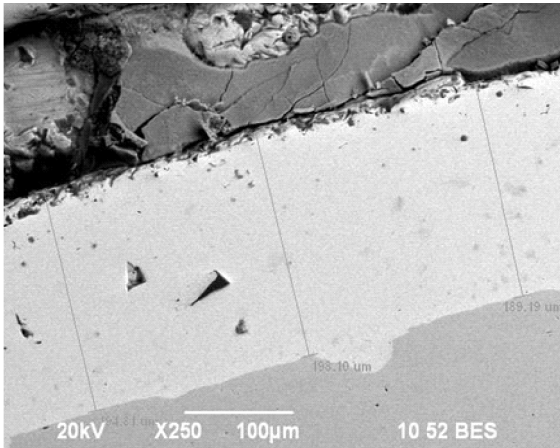


Figura 5. Micrografía del borde de la probeta, correspondiente a la solución 1 y obtenida con una densidad de corriente de 7,5 A/dm².

Las probetas con mayor densidad de corriente aplicada con un tiempo constante son las que tuvieron mayor espesor, debido a que el cátodo se carga más por el mayor flujo de electrones; por tanto, hay una mayor demanda de iones de cobre y una mayor deposición.

El aumento de espesor de las probetas de la concentración del baño 1 genera más espesor, como se muestra en las corrientes 1 y 3, debido a la mayor cantidad de cobre presente en el baño.

Para corroborar lo observado mediante SEM, se realizó la comparación con el obtenido teóricamente por gravimetría con la siguiente expresión [4, 15]:

$$E = W / (A * P) \text{ Ecuación 1.}$$

E= espesor; W= peso del metal depositado (g); A= área (cm²); P= peso específico (g/cm³).

Más adelante se pueden observar las probetas con la concentración del baño 1 y las diferentes corrientes (tabla 7).

La diferencia de los valores de los espesores obtenidos por SEM y calculados por gravimetría se debe a que por gravimetría se presume que el espesor es uniforme en toda el área; en cambio, como se observó en las micrografías a lo largo de la probeta, el espesor varía, por lo que se tomó de las medidas fue un promedio. Aun así, la diferencia se puede deber a que en los extremos de la probeta hay una mayor concentración de corriente

que genera grumos y también por el llamado efecto hueso, donde en las esquinas hay más concentración de energía; en la mayoría de los casos, en los recubrimientos electrolíticos se presenta un mayor espesor en estas zonas (tabla 7).

Tabla 7
Comparaciones entre espesor promedio SEM y por gravimetría

Concentración del baño	Corriente (A)	Promedio espesor medido en el SEM (µm)	Espesor por gravimetría (µm)	Peso del cátodo (g)
1	1	155,623	173,4	6,48
1	2	170,540	181,4	7,95
1	3	247,785	271,8	9,352
2	1	122,220	134,5	4,78
2	2	194,512	215,2	8,14
2	3	222,055	236,8	8,86

En la figura siguiente se observa el efecto del incremento de la densidad de corriente en la obtención de los recubrimientos, debido a que al aumentar la densidad de corriente hasta cierto límite (7,5 A/dm²) se eleva la velocidad de electrodeposición; sin embargo, cuando el valor de densidad excede el valor límite de trabajo –esto es, la densidad de corriente crítica–, se presenta una tendencia a obtener depósitos con grumos y rugosos; si la densidad de corriente es de 5 A/dm², se obtienen probetas recubiertas sin la presencia de grumos (figura 6) [3].

CONCLUSIONES

Los recubrimientos electrolíticos a partir de un desecho industrial del producto de decapado permiten obtener buenos recubrimientos para densidades de corriente de 5 A/dm² y concentración de 222 g/L de Cu SO₄, y concentración de 33,63 g/L de H₂SO₄ por su uniformidad y adherencia.

Se ha establecido un método para caracterizar las soluciones del residuo utilizado y el procedimiento para llevar las soluciones a las concentraciones estándar de soluciones empleadas para la electrodeposición de cobre.

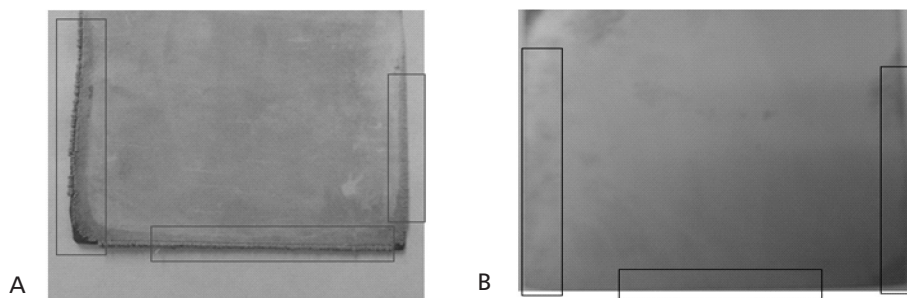


Figura 6. A) Probeta con densidad de corriente de 7,5 A/dm², con la presencia de grumos. B) Probeta con densidad de corriente de 5 A/dm², sin la presencia de grumos.

Se ha implementado la técnica de microscopía electrónica de barrido para determinar el espesor y la morfología de los recubrimientos, como estrategia para constatar y complementar los análisis realizados por la técnica de gravimetría.

Se han obtenido recubrimientos de cobre con espesor adecuado para elaborar polos a tierra.

Se ha elaborado una metodología experimental para la obtención de recubrimientos de cobre introduciendo técnicas de análisis físico, como espectroscopia de rayos X de energía dispersiva para el análisis químico elemental de las soluciones, y microscopía electrónica de barrido para el estudio de las características físicas de los recubrimientos.

Mediante esta metodología experimental se logra fabricar recubrimientos de buenas propiedades fisicoquímicas para aplicación industrial a partir de un desecho, lo que permite bajar costos en las futuras aplicaciones industriales, ya que se reducen los costos en los insumos requeridos para tal fin.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto lo financió la Dirección de Investigaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Convocatoria 2010.

REFERENCIAS

1. Mariaca, L. (1997). Estudio del efecto del NO₂ en la corrosión atmosférica del cobre. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense.
2. Krätshmer, A., Odenevall-Wallinder, I. & Leygraf, C. (2002). The evolution of outdoor copper patina. *Corros. Sci.*, 44, 425-450.
3. Fitzgerald, K.P., Nairn, J. & Atrens, A. (1998). The chemistry

of copper patination. *Corros. Sci.*, 40, 2029-2050.

4. Fitzgerald, K.P., Nairn, J., Skennerton, G. & Atrens, A. (2006). Atmospheric corrosion of copper and the colour, structure and composition of natural patinas on copper. *Corros. Sci.*, 48, 2480.
5. Palanivel, V., Huang, Y. & Van Ooij, W.J. (2005). Effects of addition of corrosion inhibitors to silane on the performance of AA2024-T3 in a 0.5 M NaCl solution. *Prog. Org. Coat.*, 53, 153-168.
6. Zucchi, F., Grassi, V., Frignani, A. & TrabANELLI, G. (2004). Inhibition of copper corrosion by silane coatings. *Corros. Sci.*, 46, 2853-2865.
7. Sinapi, F., Delhalle, J. & Mekhalif, Z. (2002). XPS and electrochemical evaluation of twodimensional organic obtained by chemical modification of selfassembled monolayers of (3-mercaptopropyl)trimethoxysilane on copper surfaces. *Mat. Sci. Eng. C - Bio. S.*, 22, 345-353.
8. Sinapi, F., Julien, S., Auguste, D., Hevesi, L., Delhalle, J. & Mekhalif, Z. (2008). Monolayers and mixed-layers on copper towards corrosion protection. *Electrochim. Acta*, 53, 4228-4238.
9. Zucchi, F., Frignani, A., Grassi, V., TrabANELLI, G. & DalColle, M. (2007). The formation of a protective layer of 3-mercaptopropyl-trimethoxy-silane on copper. *Corros. Sci.*, 49, 1570-1583.
10. Tremont, R., De Jesus-Cardona, H., García-Orozco, J., Castro, R.J. & Cabrera, C.R. (2000). 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane as a Cu corrosion inhibitor in KCl solution. *J. Appl. Electrochem.*, 30, 737-743.
11. Jennings, G.K., Munro, J.C., Yong, T.H. & Laibinis, P.E. (1998). Effect of chain length on the protection of copper by n-alkane-thiols. *Langmuir*, 14, 6130-6139.
12. Sinapi, F., Lejeune, I., Delhalle, J. & Mekhalif, Z. (2007). Comparative protective abilities of organothiols SAM coatings applied to copper dissolution in aqueous environments. *Electrochim. Acta*, 52, 5182-5190.
13. Osterholtz, F.D. & Pohl, E.R. (1992). Kinetics of the hydrolysis and condensation of organofunctional siloxanes: a review. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 6, 127-149.
14. Arkles, B., Steinmetz, J.R., Zazyczny, J. & Mehta, P. (1992). Factors contributing to the stability of alkoxysilanes in aqueous solution. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 6, 193-206.
15. Pu, Z., Van Ooij, W. & Mark, J. (1997). Hydrolysis kinetics and stability of bis (triethoxysilyl) ethane in water-ethanol solution by FTIR spectroscopy. *J. Adhes. Sci. Technol.* 11, 29-47.
16. Zhang, D.Q., Cai, Q.R., He, X.M., Gao, L.X. & Kim, G.S. (2009). The corrosion inhibition of copper in hydrochloric acid solutions by a tripeptide compound. *Corros. Sci.*, 51, 2349-2354.

17. Liu, T., Yin, Y.S., Chen, S.G., Chang, X.T. & Cheng, S. (2007). Super-hydrophobic surfaces improve corrosion resistance of copper in seawater. *Electrochim. Acta*, 52, 3709-3713.
18. Deslouis, C., Tribollet, B., Mengoli, G. & Musiani, M.M. (1988). Electrochemical behavior of copper in neutral aerated chloride solution. II. Impedance investigation. *J. Appl. Electrochem.*, 18, 384-393.
19. Curkovic, H.O., Stupnisek-Lisac, E. & Takenouti, H. (2009). Electrochemical quartz crystal microbalance and electrochemical impedance spectroscopy study of copper corrosion inhibition by imidazoles. *Corros. Sci.*, 51, 2342-2348.
20. Wu, X.J., Ma, H.Y., Chen, S.H., Xu, Z.Y. & Sui, A.F. (1999). General equivalent circuits for faradaic electrode processes under electrochemical reaction control. *J. Electrochem. Soc.*, 146, 1847-1853.
21. Norma IEC 60364-5-54 Ed. 2.0b: 2002. Low-voltage electrical installations - Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment - Earthing arrangements and protective conductors.
22. Arvia, A.J. & Carrozza, J.S.W. (1962). Mass transfer in the electrolysis of $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ in aqueous solutions under limiting current and forced convection employing a cylindrical cell with rotating electrodes. *Electrochim. Acta.*, 7, 65-78.

Tecnología

La bilastra estructural (muro bilastra)

Fabián Andre Sánchez Bonilla

Máster en Ingeniería Estructural (Università Roma Tre, Roma, Italia)

El objetivo de este artículo es dar a conocer uno de los sistemas prefabricados más utilizados actualmente en Europa, y así lograr que los lectores, en su mayoría ingenieros, puedan poner en práctica este novedoso sistema de construcción prefabricado, gracias a las grandes ventajas y beneficios que éste ofrece; se trata de la bilastra estructural.

Este sistema se utilizó en la construcción del muro intermedio en el túnel vehicular o galería artificial bajo el cruce de la nueva línea de trenes de alta capacidad Turín - Milán, km 114+641 hasta km 115+231 Pregnana (Italia), en el cual tuve la oportunidad de participar en el estudio y proyectación de tan novedoso sistema. Por esto quiero, con el presente artículo, darles a conocer este sistema para que en un futuro podamos implementarlo en Colombia y realizar obras de gran envergadura, más rápidas, limpias y económicas para que día tras día sigamos avanzando en tecnología y conocimiento.

Sin más preámbulos, a continuación presento una corta pero sustanciosa descripción, con un interesante apoyo gráfico y diseños del sistema de las bilastras estructurales.

Las bilastras son realizadas con muros portantes en concreto armado, constituido por dobles losas, una externa y una interna, prefabricadas y armadas. Después de colocarlas en obra se efectúa el vaciado de completitud con concreto ordinario. En la fase de prefabricación



Figura 1. Túnel línea de alta capacidad Turín - Milán.

es posible insertar en las losas las armaduras longitudinales resultantes de los cálculos estructurales. El espesor general está dado en función de las exigencias estáticas previstas del proyecto estructural. En las paredes perimetrales, la losa externa puede tener una altura mayor respecto a la interna del espesor de la placa, para la contención de la fundición.

VENTAJAS DEL SISTEMA BILASTRA

- Eliminación completa de la formaleta para el vaciado, evitando así los paneles de encofrado (y, por ende, andamios) muy altos, superiores a los 7 m, de no fácil ejecución con sistemas tradicionales, lo que logra rebajar los costos de construcción notablemente.
- Tiempos de construcción reducidos y rápida colocación en obra.
- Máxima flexibilidad dimensional, funcional y estructural.
- La facilidad de no tener aceros en la obra.
- El vaciado de llenado crea una pared portante continua.
- Es posible construir cualquier tipo de abertura o luz en éstas, como una ventana.
- Presenta una excelente durabilidad en ambientes externos e internos.



Figura 2. La bilastro estructural.

DATOS TÉCNICOS

- Altura: variable, con base en el proyecto (el límite de las dimensiones máximas está dado por la capacidad de transporte).
- Longitud módulos: variable, con base en el proyecto (límite de dimensiones de las formaletas del vaciado).
- Espesor losas: variable.
- Espesor muro: variable, con base en el proyecto y las exigencias estáticas dadas por el diseño.
- Armadura: variable, con base en el proyecto y las exigencias estáticas dadas por el diseño.

Por la extrema facilidad de puesta en obra, la bilastra tiene un excelente desempeño en la construcción de muros de contención, muros portantes prefabricados civiles e industriales, represas, garajes, sótanos, piscinas, cerramientos de naves industriales, túneles o puentes, etc.

Figura 3. La bilastra estructural.



TRANSPORTE

Según su tamaño, los elementos prefabricados se pondrán en el camión sobre caballetes o rastreles. Los muros se descargarán en posición horizontal, con los elementos de elevación previstos en ellos. El lugar de almacenamiento deberá ser de fácil acceso, sin restos de escombros y plano. Para proteger el aspecto y las cali-

dades de las piezas, éstas deberán depositarse sobre un material resistente al peso, suficientemente blando para amortiguar los golpes y sin que deje marcas a causa de su humedad, su dureza o su color. El almacenamiento de las piezas debe garantizar la estabilidad de éstas (atar las piezas, poner tacos, etc.).

Si para facilitar las manipulaciones es preciso tumbar las piezas, hay que procurar utilizar topes de madera para no dañar ninguna cara del muro.

Las dimensiones de la carga están sujetas a la reglamentación del país, a la capacidad portante de los puentes, a la capacidad espacial de los túneles y puentes y a la capacidad de carga de los vehículos que se van a utilizar; sin embargo, el sistema permite modular las balastras de forma que se adapten a cualquier región.



Figura 4. Transporte de la balastra.



Figura 5. Almacenamiento de la balastra.

Figura 6. Almacenamiento de la bilastra.



Figura 7. Puesta en obra de la bilastra.



Figura 8. Puesta en obra de la bilastra.

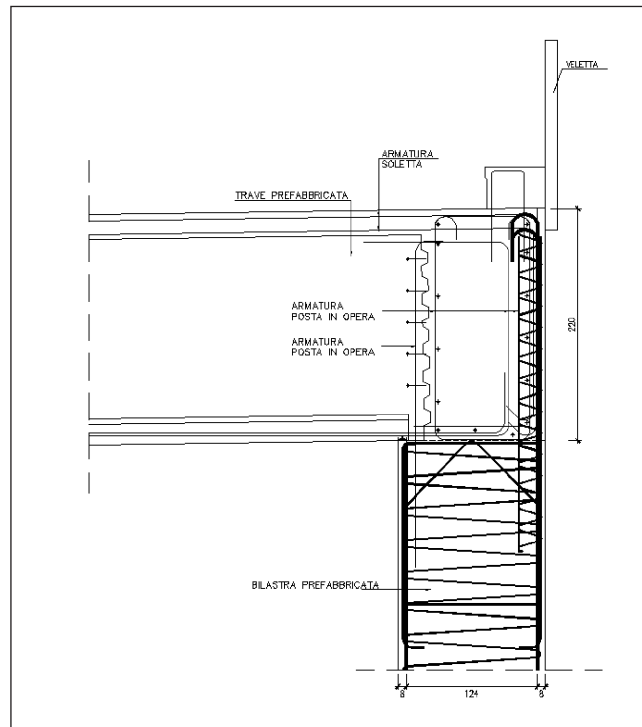


Figura 9. Sección bilastra.

CONEXIONES

La bilastra se puede realizar para cualquier tipo de fundación, como pilotes, placa maciza, zapatas y vigas, o con fundación incorporada, teniendo en cuenta que esta última ofrece las mismas características finales del muro fundido totalmente en obra o el muro de contención, pero evidencia las siguientes ventajas:

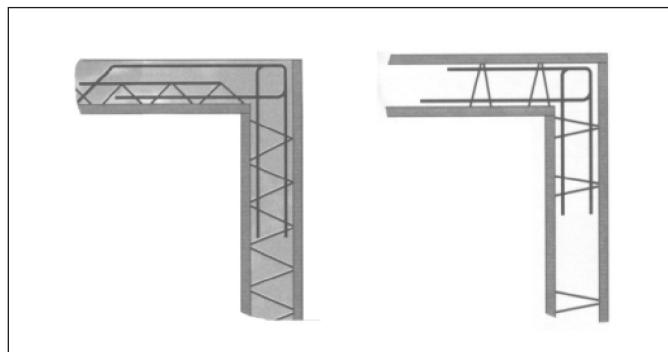


Figura 10. Conexiones en sección y planta.

- No requiere formaleta para la fundación, pues la bilastra actúa como tal.
- No necesita montar la armadura de la fundación con los flejes y refuerzos en obra, ya que la trae desde el taller, facilitando el trabajo y evitando tener que posicionar los aceros de continuación para la conexión fundación-muro.
- La fundación prefabricada absorbe mejor los esfuerzos ejercidos en la base durante la fundición o vaciado del concreto.
- La colocación de las bilastras es rapidísima por cuanto no hay ningún acero de continuación en la obra que podría demorar el proceso, ya que todo se hizo en los talleres.
- La intervención del herrero se limita a la colocación de los acero de traslapo entre los elementos, ya que desarrolla la mayoría de su trabajo en el taller, lo que brinda más seguridad y rapidez.

En síntesis, con el sistema de bilastras hay:

- Mayor seguridad en la obra.
- Ahorro de tiempo y costos sobre toda la obra, ya que se optimiza el material al minimizar el desperdicio, se aumenta la velocidad de ejecución al simplificar el montaje y se incrementan los rendimientos.
- Obras más limpias, por cuanto este sistema ayuda a disminuir el costo de aseo final, que en algunas obras es bastante considerable, si se tiene en cuenta el lavado de vías o de los vehículos que entran y salen de la obra.
- Calidad certificada del producto.
- Facilidad de mantener y operar toda la maquinaria y herramientas requeridas por cuanto buena parte de la obra se hace en los talleres, lo que permite reducir costos de transporte, optimizar tiempos y trabajar con todas las normas de seguridad industrial en áreas certificadas.