

- Sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas (parte II).
- Evaluación de la rigidez axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural.
- Algoritmo basado en una red inmune artificial para la alineación de patrones de puntos.
- Identificación modal a partir de vibraciones ambientales para puentes peatonales metálicos por medio de la metodología NExT/ERA.
- Desarrollo de proyectos de infraestructura de transporte en el marco de los TLC.



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

# Ingeniería

**86**

## 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)  
MANUEL FELIPE MARTÍNEZ MANTILLA  
(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. 533 Y 397  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto: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

### Elementos para la planeación del transporte

*Santiago Henao Pérez*

## 7-15

### Sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas (parte II)

*Fernando Sánchez Sabogal*

La infiltración de agua a través de los vacíos interconectados de las capas asfálticas produce pérdidas de adherencia entre el ligante y los agregados, dando inicio a desprendimientos que pueden derivar en la destrucción del pavimento. Un primer paso para enfrentar los problemas causados por la presencia de agua en estos sistemas, consiste en cuantificar la permeabilidad de las mezclas asfálticas utilizadas en las capas de rodadura.

## 17-24

### Evaluación de la rigidez axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural

*Jairo Uribe Escamilla*

Se presentan los resultados de ensayos a carga axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. En un segundo artículo se mostrarán los resultados de ensayos a flexión de esos paneles. Dichas propiedades son necesarias para efectuar un análisis por elementos finitos de un modelo de viviendas para atender emergencias, como parte del proceso de homologación del diseño ante la Comisión Permanente del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

## 25-33

### Algoritmo basado en una red inmune artificial para la alineación de patrones de puntos

*Manuel Ignacio Cuadrado Morad, Wilfredo Ariel Gómez Bueno,*

*Henry Argüello Fuentes*

En este artículo se propone un algoritmo basado en un modelo de red inmune artificial, usando como función de aptitud una versión modificada de la distancia parcial de Hausdorff, la cual permite encontrar la mejor transformación geométrica que relaciona ambos patrones de puntos. El algoritmo propuesto se probó experimentalmente para evaluar su efectividad y velocidad de convergencia, obteniendo resultados satisfactorios..

---

# Contenido

**35-42**

**Identificación modal a partir de vibraciones ambientales para puentes peatonales metálicos por medio de la metodología NExT/ERA**

*Andrés Oswaldo Zabala Mejía, Juan Carlos Gutiérrez Ruidíaz, Daniel Ruiz Valencia*

En este artículo se presenta la implementación de la metodología NExT-ERA para la identificación de las propiedades modales de dos puentes peatonales pertenecientes al sistema de transporte Transmilenio. Los resultados de NExT-ERA en frecuencia se comparan con los obtenidos mediante una modelación por elementos finitos de los puentes, arrojando resultados bastante cercanos (diferencia promedio del 3,5%).

**43-49**

**Desarrollo de proyectos de infraestructura de transporte en el marco de los TLC**

*César Augusto Peñaloza Pabón*

Conferencia organizada por el Centro de Estudios de Vías y Transporte de la Escuela Colombiana de Ingeniería el jueves 3 de mayo de 2012.

**51 / TECNOLOGÍA**

**Innovación en la construcción en Colombia, una obligación**

*Nury del Rosario Forero Hurtado*

**55 / ALCANCE Y POLÍTICAS**

# Editorial

## Elementos para la planeación del transporte

**SANTIAGO HENAO PÉREZ, M.Sc**

Director del Centro de Estudios de Vías y Transporte

santiago.henao@escuelaing.edu.co

Con ocasión de la reciente presentación y aprobación, por parte del Concejo de Bogotá, del “Plan de desarrollo económico y social para Bogotá Distrito Capital 2012-2016, Bogotá Humana”, parece pertinente hacer algunas reflexiones sobre cómo debería ser la planeación de la ciudad, con especial énfasis en los sistemas de transporte, y señalar algunos errores que se cometen reiteradamente en la presentación de los planes de desarrollo.

En cualquier texto introductorio de planeación de transporte se define el ejercicio de planeación como un proceso *continuo* de previsión de los recursos y servicios requeridos para obtener objetivos determinados, según un orden de prioridades establecido y que permite escoger la solución óptima o las mejores soluciones entre varias opciones.

Estos procedimientos se aplican con la denominación genérica de planeación, planificación o planeamiento, y dado que intervienen muchas variables en el problema, su solución no puede dejarse al azar; por el contrario, debe haber un control en todas las decisiones que se vayan a tomar, ya que afectarán a un numeroso grupo de la población, por largos periodos de tiempo. Además, por las altas cifras de inversión y recursos en general que demandan los sistemas de transporte, se hace indispensable contar con la participación y regulación tanto del gobierno central como del local. Con la propuesta de nuevos sistemas de transporte, como Transmilenio, metro liviano, metro pesado, tranvía, Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), trenes de cercanías, y la debida coordinación e integración de estos sistemas, una buena planeación parece más importante que nunca.

El primer paso es definir metas y objetivos verificables, cuantificables y medibles, y determinar claramente qué es lo que se pretende con el plan; no basta con presentar el plan de desarrollo como un simple discurso o catálogo de proyectos o buenas intenciones, puesto que, como ya se mencionó, se requiere un proceso continuo y de gestión permanente; así que resulta fundamental ante todo definir el tipo de ciudad que se quiere para poder llegar a buen puerto. Se trata, pues, de un proceso que se ha de caracterizar por una metodología ordenada, rigurosa, objetiva y que sirve de apoyo en la selección y toma de decisiones cuando se han fijado las prioridades de inversión, toda vez que siempre se tendrán limitaciones en los recursos.

La planeación, en el caso de Bogotá, no puede sustraerse de lo que algunos han denominado “ciudad-región” o área metropolitana, en el mismo sentido en que se conciben grandes capitales europeas o de Estados Unidos; por eso, la región debe incluir los municipios vecinos de la sabana, al departamento de Cundinamarca y a la nación.

Bogotá es un problema nacional, por cuanto en la capital del país habita aproximadamente el 18% de la población colombiana y se genera un alto porcentaje del producto interno bruto nacional (algunos autores lo estiman en más del 50%); además, representa cerca de un 84% del PIB de Cundinamarca, y concentra el 90% de las industrias y el 95% de las empresas de servicios creadas en la última década.

Una acertada planeación no es producto de la casualidad o del azar, para conseguirla hay que trabajar en la integración regional. Esto significa que la planeación no termina con los límites físicos del Distrito Capital, sino

---

que las zonas urbanas y rurales deben laborar de común acuerdo, armónicamente, en la planeación regional y urbana. Problemas como los de seguridad, suministro de servicios públicos esenciales y movilidad no conocen fronteras, por lo que han de atacarse en forma integral y coordinada. La expansión de actividades productivas debe articularse con los planes de ordenamiento locales y alinearlos con el de Bogotá, especialmente en la conectividad de los corredores más importantes, como la calle 13, la autopista Sur, la calle 80, la autopista Norte, así como en los nuevos ejes de actividades logísticas, industriales y de almacenamiento, en la periferia occidental. Tales asentamientos y polígonos industriales están consumiendo grandes extensiones de suelo, ahora notorias, en Chía, Mosquera, Soacha, Cota, Funza, Madrid, Sopó, Tocancipá y Gachancipá.

La planeación, en fin, ha de ser absolutamente integral y debidamente coordinada con todas las entidades y usuarios, en especial en una ciudad como Bogotá, donde nunca se había requerido tanta planeación como ahora.

Es posible citar numerosos ejemplos de objetivos y metas de planeación, sin pretender por ello hacer una lista exhaustiva:

- Promover el tráfico (aliviar la congestión)
- Aumentar la oferta vial y mitigar la insuficiencia de capacidad vial
- Disminuir tiempos de viaje
- Mejorar la seguridad
- Reducir los costos del servicio
- Proporcionar accesibilidad a los predios
- Aumentar la frecuencia de los servicios
- Hacer que los servicios sean accesibles a mayor número de personas (cobertura)
- Mejorar la calidad del servicio
- Ordenar las tendencias de uso del suelo
- Promover cambios en el uso del suelo (capacidad estructurante)
- Mantener o mejorar la base tributaria (valorización, peajes, impuesto predial, concesiones, alianzas público-privadas)
- Reducir la contaminación ambiental

La anterior lista ilustra el tipo de objetivos y metas –los cuales tienen en común que son medibles, cuantificables y verificables– necesarios para someter el plan al escrutinio

público de rendición de cuentas y poder determinar así su cumplimiento en ejecución presupuestal, cronograma y metas físicas, así como en alcance y logro de objetivos. Además, cualquier plan debe mostrar una perdurabilidad o “sostenibilidad” –como se ha dado en llamar recientemente– de tipo físico, territorial, económico, social y, por supuesto, ambiental. Ha sido un error recurrente no culminar o no ejecutar por completo los planes e ir cambiando tecnologías y procesos, sin haber evaluado lo suficiente la bondad o no de las propuestas de planes anteriores.

Y no es sólo el problema de la movilidad, que a la hora de la verdad es un costo que tenemos que sufragar por desplazarnos de un sitio a otro de la ciudad y que le resta competitividad a la capital del país a escala nacional e internacional. Cuando los sistemas de transporte no funcionan como debieran, los bogotanos todos pagamos ese sobreprecio en pérdidas de tiempo, mayores precios por ineficiencias y la pérdida de oportunidades laborales y comerciales. Sencillamente, ninguna ciudad puede costear o sostener los costos impuestos y derivados de los sistemas ineficientes de transporte.

El sistema de transporte regional actual enfrenta una demanda creciente, al igual que restricciones de capacidad, cuellos de botella, baja conectividad y muy baja oferta de otros sistemas de transporte alternativos. De no continuarse con el dinamismo que traía la ciudad, pueden verse estancadas muchas de las actividades actuales, y reducirse la competitividad comercial y geográfica que tuvo en algún momento.

No se trata sólo de hacer obras y construcciones nuevas sino de aprovechar también al máximo lo existente con sus ventajas comparativas y competitivas. Lo anterior incluye el mantenimiento preventivo de la malla vial principal, secundaria y terciaria, incluyendo el acceso a los barrios.

La planeación, en resumen, permite el trabajo en equipo; finalmente, es la infraestructura de los sistemas de transporte la que soporta el desarrollo económico, pues se trata de evitar errores y fracasos que han sucedido en el pasado.

Como se vio, el complejo proceso de planeación no puede definirse con una sola palabra, pero sí existe un término para significar todo aquello que encierra precisamente lo que no es planeación: improvisación.

# Sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas (parte II)

## About the permeability of dense graded asphalt mixes

**FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL**

Ingeniero civil  
elexdos@yahoo.com

Recibido: 10/09/2011 Aceptado: 12/10/2011  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La infiltración de agua a través de los vacíos interconectados de las capas asfálticas produce pérdidas de adherencia entre el ligante y los agregados, dando inicio a desprendimientos que pueden derivar en la destrucción del pavimento. Un primer paso para enfrentar los problemas causados por la presencia de agua en estos sistemas consiste en cuantificar la permeabilidad de las mezclas asfálticas utilizadas en las capas de rodadura. Partiendo de datos sobre la granulometría de los agregados y sobre la permeabilidad y la composición volumétrica de núcleos de pavimentos asfálticos en servicio, se ha desarrollado una ecuación que permite estimar la permeabilidad de una mezcla asfáltica densa a partir de su porcentaje de vacíos con aire y de la granulometría de los agregados que la constituyen. La ecuación puede ser utilizada por los ingenieros de pavimentos para controlar los niveles de permeabilidad de estas mezclas tanto durante la fase de diseño, como durante su colocación en el terreno.

**Palabras claves:** mezcla asfáltica, permeabilidad, pavimento, vacíos con aire, carreteras.

### Abstract

Infiltration of water through the interconnected voids of the asphalt layers produces the loss of the adhesive bond between the aggregate surface and the asphalt binder, initiating deterioration which can result in the destruction of the mat. A first step to face the problems caused by the presence of water in these systems is to quantify the in-place permeability of asphalt mixes used on the surface layers that wear traffic.

Based on data on the aggregate gradation and on the permeability and the volumetric composition of existing asphaltic pavement cores, an equation has been developed to estimate the permeability of a dense graded asphalt mix, starting from the percentage of air voids and the gradation of the aggregate that constitute it. The equation can be used by pavement engineers to control the permeability of these mixtures during the design phase as well as during its setting in-place.

**Keywords:** asphalt mix, permeability, pavement, air voids, highways.



## ELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DESARROLLO DE LA NUEVA CORRELACIÓN

Como resultado del análisis de las ecuaciones, se han elegido los parámetros volumétricos y granulométricos que se describen a continuación para el desarrollo del nuevo modelo de estimación indirecta de la permeabilidad.

### Parámetros volumétricos

#### Vacíos con aire (VA)

La necesidad de disponer del volumen de vacíos con aire (VA) como insumo de una ecuación para determinar la permeabilidad de la mezcla no resiste discusión. No obstante, se debe tener en cuenta que existen varios procedimientos normalizados para la medida de la densidad de las probetas, a partir de la cual se determina el volumen de vacíos con aire, y que éstos no dan siempre los mismos resultados.

El método tradicionalmente utilizado en Colombia para determinar las densidades de las probetas asfálticas durante el diseño de las mezclas y en los controles de construcción de pavimentos es el conocido como el método de la probeta saturada y superficialmente seca (SSS), que corresponde a la norma ASTM D2726. La determinación de la densidad empleando especímenes parafinados (norma ASTM D1188) está recomendada para probetas con apariencia abierta, que exhiban vacíos interconectados o que presenten absorciones de agua superiores a 2% en volumen, aunque, en la práctica, es poco usada en los diseños y en los controles diarios de las obras colombianas. El método de sellado automático por vacío para determinar la densidad de probetas asfálticas compactadas, conocido como Corelok (norma ASTM D6752), no se ha empleado en el país; sin embargo, los datos obtenidos mediante su uso los han utilizado investigadores extranjeros en los años recientes para calcular los vacíos con aire en el establecimiento de algunas correlaciones con la permeabilidad (10, 13).

En general, quienes han hecho comparaciones entre los resultados obtenidos con estos procedimientos manifiestan que los cálculos de vacíos a partir del método de sellado al vacío coinciden razonablemente con los obtenidos a partir del método SSS, cuando las probetas presentan niveles de absorción por debajo de

2%, típicos de mezclas elaboradas con gradaciones “finas”. Consideran, además, que las probetas de mezclas preparadas con agregados de gradación gruesa tienen vacíos con aire de mayor tamaño, los cuales pueden llegar a interconectarse, permitiendo que el agua entre y también drene con facilidad durante el desarrollo del ensayo ASTM D2726, creando problemas de falta de precisión al desplazar un menor volumen de agua y, consecuentemente, subestimando el volumen bruto de las probetas. Por tal motivo, han preferido el uso del dispositivo Corelok, el cual dicen que da lugar, en estos casos, a contenidos de vacíos con aire más altos (10, 29, 46). No obstante, hay al menos una investigación cuyas conclusiones son diametralmente opuestas (47).

Aunque, en principio, en este estudio se han utilizado los vacíos con aire (VA) obtenidos a partir de la ejecución del ensayo descrito en la norma ASTM D2726, por cuanto en Colombia no se dispone de equipos para la determinación rutinaria de la densidad mediante sellado por vacío, también se presenta el ejercicio para el caso de que éstos se hayan calculado a partir de los resultados de la prueba ASTM D6752.

#### Vacíos en los agregados minerales (VAM)

La ecuación 7 incluye los vacíos en los agregados minerales (VAM) como parámetro para calcular la permeabilidad y da una justificación discutible en relación con su presencia (13). Para los efectos de esta investigación no se estimó necesaria su inclusión en los modelos de regresión, por cuanto el componente de los VAM que incide sobre la permeabilidad es el contenido de vacíos con aire. En consecuencia, incluir también los VAM en la ecuación equivaldría a considerar los vacíos con aire por duplicado.

### Parámetros de los agregados pétreos

#### Granulometría

Las relaciones entre las granulometrías de los agregados pétreos de las mezclas asfálticas convencionales y las estructuras granulares de éstas, formadas durante el proceso de compactación, se estudiaron hace más de 30 años, quedando demostrado que la formación de las estructuras depende, fundamentalmente, del escalonamiento granulométrico y, en menor grado, de la forma

y de la textura superficial de las partículas (25). Por lo tanto, cualquier cambio en la granulometría incidirá en la cantidad de espacio disponible dentro del esqueleto granular y, en consecuencia, en la permeabilidad de la mezcla. Desafortunadamente, las leyes que gobiernan el efecto de la granulometría sobre el empaquetamiento de los agregados no son bien conocidas por el común de los diseñadores de mezclas asfálticas.

Las ecuaciones de correlación extraídas de la literatura e incluidas en este documento incorporan varios parámetros asociados con la granulometría: tamaño promedio de partícula ( $D_p$ ), tamaño máximo nominal (TMN), relación de agregado grueso (RAG) y porcentajes que pasan diferentes tamices.

El tamaño promedio de partícula ( $D_p$ ) incluido en la ecuación propuesta por Masad et al. (ecuación 8) corresponde al volumen del agregado y del asfalto absorbido (44). Según describen los autores, se obtiene calculando el tamaño promedio de partícula retenida en cada tamiz y determinando luego el diámetro promedio de toda la granulometría, mediante una ponderación de los pesos de agregado retenidos en los diferentes tamices. En razón de que la granulometría del agregado tiene una incidencia tan importante sobre la permeabilidad de la mezcla, al elaborar el presente informe se ha considerado que definir la granulometría a través de un único valor promedio dentro de una ecuación de correlación genera gran incertidumbre.

Teniendo en cuenta la existencia de estudios que indican que la permeabilidad de la mezcla depende del tamaño máximo nominal (TMN) del agregado, este parámetro se incluyó en algunos de los modelos analizados en el presente estudio.

La relación de agregado grueso (RAG) es otro parámetro interesante de analizar en relación con su inclusión en una expresión para estimar la permeabilidad de un concreto asfáltico compactado. Los autores de la ecuación 5 la definieron como el porcentaje de agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz, en tanto que el grupo que desarrolló la ecuación 7 la definió como el porcentaje retenido en un tamiz tres tamaños más pequeño (dentro de la serie especificada para verificar la granulometría de los agregados) que el correspondiente al TMN, dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz. Para los propósitos del presente estudio se consideró importante la adopción de esta relación,

aunque no definida de una manera tan aparentemente arbitraria.

La separación entre el agregado grueso y el fino en una mezcla asfáltica debe ser más específica que la utilizada tradicionalmente en los sistemas de clasificación de suelos. En ese orden de ideas, la definición de la RAG debe ir destinada a determinar los grados de empaquetamiento y de trabazón de los agregados; así, Bailey (48) considera que el agregado grueso (AG) está constituido por las partículas de mayor tamaño que, al ocupar determinado volumen, crean espacios vacíos entre ellas, en tanto que el agregado fino (AF) es el conjunto de partículas que ocupan parcialmente los vacíos creados por el agregado grueso en la mezcla. De acuerdo con estas consideraciones, resulta evidente que se requiere más de un tamaño de tamiz para definir si un agregado pétreo es grueso o fino. Bailey determinó que el tamiz que separa el agregado grueso del fino, al cual denominó “tamiz de control primario”, es aquel cuya abertura sea la más cercana al resultado de multiplicar el TMN por 0,22. Aplicando esta pauta, los tamices que separan los agregados gruesos de los finos para distintos TMN son los que se muestran a continuación (tabla 2). En los modelos analizados en desarrollo del presente informe se ha utilizado la RAG definida de acuerdo con este criterio.

**Tabla 2**

Abertura de los tamices de control primario (TCP) para diferentes tamaños máximos nominales (TMN) (48)

<b>TMN (mm)</b>	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
<b>TCP (mm)</b>	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18

Los tamaños  $D_{60}$  y  $D_{10}$ , así como su relación, llamada coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), se han usado tradicionalmente para definir la continuidad de una granulometría y se citan en la literatura relacionada con la estructura granular de las mezclas asfálticas (25). Por tal razón, estos parámetros también se tomaron en cuenta para la elaboración de los modelos.

Los porcentajes de agregado que pasan los diferentes tamices dan la información real sobre su composición granulométrica y, por lo tanto, muestran mejor que cualquier relación o indicador promedio la verdadera distribución de los tamaños de las partículas. La

elaboración de modelos a partir de la información granulométrica detallada se consideró, por consiguiente, indispensable.

### Textura y forma de las partículas

La textura y la forma inciden en la manera como se acomodan las partículas del agregado dentro de la mezcla compactada (25). Por razones ligadas fundamentalmente a la estabilidad de la mezcla, las especificaciones de construcción exigen unos índices mínimos en relación con estos dos factores. No resulta sencillo incorporar su efecto en una expresión simplificada para estimar la permeabilidad, motivo por el cual no forman parte de ninguna de las correlaciones analizadas.

### Espesor de la capa compactada

En lo que se refiere al espesor de la capa compactada, el cual forma parte de algunas de las fórmulas incluidas en este documento, así como en otras regresiones analizadas y finalmente desestimadas por Brown et al. (13), no se consideró indispensable su inclusión en los modelos desarrollados aquí, por cuanto las actuales especificaciones de construcción vial exigen que se respete una relación mínima entre el espesor de capa y el TMN<sup>1</sup>. De este modo, se evita la combinación de espesores muy pequeños con TMN muy grandes, la cual pudiera generar problemas de permeabilidad que, eventualmente, hicieran considerar el espesor como un parámetro independiente.

## PARTE EXPERIMENTAL

### Recopilación de datos

La parte experimental del estudio que dio origen a este documento consistió en la obtención de datos apropiados en relación con la composición y las características de las mezclas asfálticas compactadas de tipo denso, que permitieran el desarrollo de una ecuación sencilla y de aplicación general para estimar indirectamente su per-

meabilidad. Para ello se realizó una revisión exhaustiva de la literatura disponible, buscando datos confiables y consistentes que permitieran alcanzar el objetivo. En los términos del presente estudio, la confiabilidad y la consistencia de los datos se refieren, específicamente, a tres aspectos: 1) que incluyeran toda la información requerida en relación con la granulometría de los agregados y con la composición volumétrica de las muestras ensayadas; 2) que las pruebas de permeabilidad se hubieran efectuado en el laboratorio mediante un solo procedimiento y que éste se encontrara normalizado, y 3) que las muestras ensayadas se hubieran compactado mediante algún método que representara la realidad de las mezclas compactadas en el terreno.

Dichas condiciones fueron satisfechas por la información correspondiente a 307 probetas. De éstas, 287 fueron obtenidas y ensayadas por un grupo de trabajo del Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto (NCAT) de Auburn (Alabama), en desarrollo de la investigación identificada como NCHRP 9-27 (13), mientras que las 20 restantes provienen de un estudio realizado por el Consejo de Investigaciones sobre el Transporte de la Universidad de Virginia, a pedido del DOT del estado del mismo nombre (28). Los 307 ensayos de permeabilidad se efectuaron en permeámetros Karol-Warner, de acuerdo con la norma provisional de ensayo ASTM PS 129-01, correspondiente con las normas vigentes en algunos DOT norteamericanos (31, 32, 33)<sup>2</sup>. Por último, las 307 probetas corresponden a testigos extraídos de pavimentos en servicio, los cuales representan la manera real como las mezclas asfálticas quedan compactadas *in situ*.

### Desarrollo de la ecuación de correlación

Empleando regresiones lineales múltiples, se desarrollaron diferentes modelos para estimar la permeabilidad de las mezclas densas compactadas, a partir de los contenidos de vacíos con aire y de algunos parámetros críticos relacionados con la granulometría de los agregados de las 307 probetas. Los resultados se sintetizan posteriormente (tabla 3).

1. El Artículo 450-06 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías exige una relación mínima de 3 entre el espesor de la capa de rodadura compactada y el TMN del agregado.

2. Debido a que la norma provisional ASTM fue retirada en 2003, no hay en el momento ningún método estandarizado que abarque todo el ámbito de los Estados Unidos de América para medir la permeabilidad al agua de los especímenes de mezclas asfálticas densas.

Teniendo en cuenta los valores de los respectivos coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) y los parámetros C-p de Mallows, se concluye que el modelo que mejor predice la permeabilidad de una mezcla asfáltica compactada es el correspondiente a la novena regresión, el cual está constituido por una combinación de los vacíos con aire y los porcentajes que pasan determinados tamices, mediante la expresión:

$$k(\text{cm/s}) = \frac{2,223 \times 10^{-8} \times (\text{VA})^{6,207} \times P_{9,5}^{2,326} \times P_{0,3}^{2,311}}{P_{2,36}^{3,053} \times P_{0,6}^{1,512} \times P_{0,075}^{2,044}} \quad (9)$$

Donde:

VA: vacíos con aire obtenidos a partir de la prueba SSS, %.

P<sub>9,5</sub>: pasa tamiz de 9,5 mm de abertura (3/8”), %.

P<sub>2,36</sub>: pasa tamiz de 2,36 mm de abertura (N.º 8), %.

P<sub>0,6</sub>: pasa tamiz de 0,6 mm de abertura (N.º 30), %.

P<sub>0,3</sub>: pasa tamiz de 0,3 mm de abertura (N.º 50), %.

P<sub>0,075</sub>: pasa tamiz de 0,075 mm de abertura (N.º 200), %.

Con el fin de determinar la influencia que tienen los parámetros incluidos en la ecuación 9 sobre la permeabilidad, cada uno de ellos se varió, dentro de los rangos representativos de las mezclas densas, manteniendo constantes los demás. Como era de esperar, se encontró que el volumen total de vacíos con aire (VA) tiene la mayor incidencia. Un cambio de ellos de 5 a 8% incrementa la permeabilidad aproximadamente 18 veces. En relación con los porcentajes que pasan los diversos tamices, tanto el efecto como el sentido en el

cual ocurre el cambio son variados. Los tamaños más incidentes son los menores, aunque con efecto contrario: mientras un aumento de 2% en el porcentaje que pasa el tamiz de 0,075 mm (N.º 200) se traduce en una reducción de 50% en la permeabilidad, un incremento de la misma magnitud en el pasante del tamiz de 0,3 mm (N.º 50) la aumenta en 30%. La incidencia de los demás tamices a causa de un cambio del mismo orden en el pasante es bastante menor, pues no supera el 15%, en más o en menos, según si sus “porcentajes que pasan” se encuentran en el numerador o en el denominador de la ecuación.

La ecuación muestra que al aumentar las proporciones de agregado que pasan por los tamices de 2,36 y 0,60 mm se reduce la permeabilidad. Este resultado concilia con el obtenido en un estudio efectuado por el DOT de Carolina del Norte (26), según el cual la presencia de fracciones de estos tamaños e intermedios hace decrecer los vacíos con aire y es deseable para obtener mezclas de menor permeabilidad. En cambio, el efecto que muestra la ecuación en relación con el pasante del tamiz de 0,075 mm (N.º 200), es discrepante con el obtenido en otros estudios: mientras la ecuación del Louisiana Transportation Research Center (ecuación 6) da a entender que un aumento en la cantidad de dicho material incrementa la permeabilidad, Schmitt et al. (49) concluyeron que el porcentaje que pasa el tamiz de 75 µm no tiene impacto sobre ella. El hecho de que en la ecuación obtenida en el presente estudio la permeabilidad disminuya al incrementar la fracción pasante de este tamiz pudiera explicarse si se considera que en las mezclas del tipo concreto asfáltico, donde

**Tabla 3**  
Mejores ajustes de regresión sobre los factores que afectan la permeabilidad

Regresión	N.º de variables	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	C-p	VA	TMN	D <sub>60</sub>	D <sub>10</sub>	Cu	RAG	P <sub>9,5</sub>	P <sub>2,36</sub>	P <sub>0,6</sub>	P <sub>0,3</sub>	P <sub>0,075</sub>
1	3	0,765	0,763	20,2	X	X				X					
2	3	0,698	0,695	112,3	X	X			X						
3	3	0,737	0,734	59,5	X		X	X							
4	3	0,766	0,764	18,8	X			X		X					
5	4	0,750	0,743	47,5	X	X	X	X							
6	4	0,767	0,764	19,3	X		X	X		X					
7	5	0,767	0,763	20,3	X	X	X	X		X					
8	5	0,762	0,758	27,0	X						X	X	X	X	
9	6	0,777	0,773	7,0	X						X	X	X	X	X

el contenido de llenante mineral es relativamente bajo, los agregados grueso y fino forman una macroestructura granular, dentro de la cual las fracciones menores “actúan como relleno (...) dentro de los huecos de la macroestructura” (50). La situación sería diferente si las mezclas fueran altamente “fillerizadas” (51).

## VERIFICACIÓN DEL MODELO ESCOGIDO

Para verificar la capacidad de la ecuación hallada para predecir la permeabilidad, se hizo, en primer lugar, una comparación entre los resultados obtenidos al aplicarla a la información sobre vacíos y granulometría correspondiente a las 226 probetas del proyecto NCHRP 9-27 antes citado y los resultados que se obtienen al emplear la fórmula propuesta por los autores de dicho proyecto (13), la cual se presenta en este informe como ecuación 7. La comparación indica que para 150 de las 226 probetas (66,4%), la ecuación obtenida en el presente estudio da lugar a valores más cercanos a los medidos. La mayor proximidad es particularmente evidente en los valores en los cuales las dos ecuaciones predicen una permeabilidad inferior a la medida.

Se realizó, además, una segunda verificación comparando los valores obtenidos al aplicar la ecuación que se propone sobre los datos de las 307 probetas, con los que se obtienen al aplicarles la expresión del Louisiana Transportation Research Center (fórmula 6). En este caso, el 84% de los valores calculados con la ecuación propuesta resultaron más cercanos a los medidos en el laboratorio. Se encontró, además, que para algunas combinaciones de los datos de las probetas ensayadas, la fórmula de Louisiana daba lugar a valores negativos del coeficiente de permeabilidad.

### Estimación de la permeabilidad empleando los vacíos con aire obtenidos a partir del ensayo Corelok

Considerando que la ecuación 9 se desarrolló utilizando los vacíos calculados a partir de las mediciones de densidad efectuadas sobre probetas saturadas y superficialmente secas (norma ASTM D2726) y que, según investigadores norteamericanos, la determinación de los vacíos a partir de la prueba Corelok (norma ASTM D6752) es más apropiada para probetas con vacíos con aire elevados, se estableció una regresión similar con los datos de las 307 probetas, pero empleando los vacíos

Corelok en lugar de los vacíos SSS. La ecuación hallada, cuyo  $R^2$  ajustado es 0,747, fue la siguiente:

$$k(\text{cm/s}) = \frac{2,22 \times 10^{-8} \times (\text{VA})^{5,85} \times P_{9,5}^{1,404} \times P_{0,3}^{2,794}}{P_{2,36}^{1,793} \times P_{0,6}^{1,925} \times P_{0,075}^{2,179}} \quad (10)$$

Los valores a los cuales da lugar esta ecuación se han comparado con los obtenidos al emplear la ecuación basada en las probetas ensayadas en condición SSS (ecuación 9). Los resultados no permiten establecer cuál resulta más apropiada, por cuanto cada una se aproxima más que la otra a los valores de permeabilidad medidos en el 50% de los casos. Además, no se advierte una tendencia que permita determinar en qué casos resulta más precisa cada una de ellas, lo que impide afirmar que el cálculo de la permeabilidad a partir de los vacíos Corelok sea más preciso que el efectuado a partir de los vacíos SSS para probetas con elevados contenidos de vacíos con aire, contrariamente a lo que se menciona en la literatura.

Lo que sí resulta evidente es que la ecuación 10 reporta resultados más confiables que la ecuación 7, hallada, como se indicó atrás, a partir del ensayo de 226 probetas en desarrollo del proyecto NCHRP 9-27. En ambas ecuaciones, los vacíos con aire son los determinados a partir de las densidades Corelok. Al comparar los resultados obtenidos al aplicar las dos ecuaciones a los datos de las 226 probetas proyecto NCHRP 9-27 se encontró que, en el 68,5% de los casos, los valores calculados con la ecuación 10 fueron más cercanos a los valores de permeabilidad medidos que los obtenidos en aplicación de la ecuación 7.

### Vacíos con aire críticos en las mezclas especificadas por el Instituto Nacional de Vías

El Artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías incluye las granulometrías que se resumen en la tabla 4, en relación con las mezclas de concreto asfáltico, densas y semidensas (52).

De acuerdo con Cooley et al. (16), las mezclas con tamaño máximo nominal de 19,0 mm se tornan excesivamente permeables cuando su coeficiente de permeabilidad supera  $120 \times 10^{-5}$  cm/s, mientras que en

**Tabla 4**  
Franjas granulométricas para mezclas de concreto asfáltico

MEZCLA	TAMIZ (mm/U.S. Standard)											
	25.0 1"	19.0 ¾"	12.5 ½"	9,5 ¾"	4,75 N.º 4	2,36 N.º 8	2,00 N.º 10	0,60 N.º 30	0,425 N.º 30	0,30 N.º 50	0,18 N.º 80	0,075 N.º 200
MEZCLAS DENSAS - % QUE PASA												
MDC-1	100	80-95	67-85	60-77	43-59	33-48	29-45	17-29	14-25	12-22	8-17	4-8
MDC-2		100	80-95	70-88	49-65	35-51	29-45	17-29	14-25	12-22	8-17	4-8
MDC-3				100	65-87	49-68	43-61	21-35	16-29	13-25	9-19	5-10
MEZCLAS SEMIDENSAS - % QUE PASA												
MSC-1	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-43	24-38	12-23	9-20	8-17	6-12	3-7
MSC-2		100	80-95	65-80	40-55	28-43	24-38	12-23	9-20	8-17	6-12	3-7

**Nota:** Los porcentajes que pasan los tamices de 2,36 mm, 0,60 mm y 0,30 mm han sido interpolados, por cuanto estos tamices no están incluidos en la especificación.

aquellas con TMN de 12,5 y 9,5 mm el cambio se hace evidente a partir de  $100 \times 10^{-5}$  cm/s. Por su parte, en un primer documento del DOT de la Florida se sugirió que las capas de rodadura con permeabilidades inferiores a  $100 \times 10^{-5}$  cm/s previenen la infiltración excesiva de agua dentro de la estructura del pavimento (9), valor que se ajustó posteriormente a  $125 \times 10^{-5}$  cm/s (53). El DOT de Virginia requiere que la permeabilidad de una capa de rodadura no exceda de  $150 \times 10^{-5}$  cm/s para un contenido de vacíos con aire de 7,5% o mayor (54).

Empleando la ecuación 9, se han calculado los vacíos con aire (VA) que corresponden a unas granulometrías coincidentes con los límites superior e inferior de los husos presentados en la tabla 4, para unos valores de permeabilidad de  $100 \times 10^{-5}$  cm/s y  $125 \times 10^{-5}$  cm/s. Los resultados (tabla 5) muestran que para la condición más desfavorable, que correspondería a la combinación de una permeabilidad límite de  $100 \times 10^{-5}$  cm/s con una granulometría ajustada a la parte inferior del huso, los vacíos con aire que darían lugar a una mezcla que pudiera considerarse permeable son, cuando menos, de 8,2% para las mezclas densas y de 7,3% para las semidensas.

El Artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías exige que las capas asfálticas de rodadura sean compactadas, como mínimo, al 94% de la densidad máxima teórica de la mezcla, en proyectos donde el tránsito de diseño no exceda de cinco millones de ejes equivalentes de 80 kN y cuando menos al 93% para

**Tabla 5**  
Vacíos con aire (VA) que darían lugar a una mezcla permeable según la ecuación 9

Mezcla	Límite del huso granulométrico	Vacíos con aire correspondientes a $k = 125 \times 10^{-5}$ cm/s (%)	Vacíos con aire correspondientes a $k = 100 \times 10^{-5}$ cm/s (%)
MDC-1	Superior	13,7	13,2
	Inferior	8,8	8,5
MDC-2	Superior	10,7	10,3
	Inferior	8,5	8,2
MDC-3	Superior	12,7	12,2
	Inferior	9,7	9,3
MSC-1	Superior	10,7	10,3
	Inferior	7,5	7,3
MSC-2	Superior	10,2	9,8
	Inferior	7,6	7,3

tránsitos mayores. Estos valores corresponden a 6 y 7% de vacíos con aire, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que no es de esperar que las mezclas asfálticas construidas con las granulometrías incluidas en la tabla 4 y compactadas sobre los niveles mínimos de densidad recién indicados presenten problemas de permeabilidad, siempre y cuando se atienda debidamente el párrafo del Artículo 450 que señala que “el material que produzca el Constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme, sensiblemente paralela a los límites de la franja por utilizar, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa”.

## CONCLUSIONES

Como resultado de la información recolectada, procesada y analizada en este estudio, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

1. Se cumplió el objetivo del estudio, cual era evaluar los factores que afectan la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas compactadas, medida con un permeámetro normalizado, y desarrollar un modelo para estimarla a partir de éstos.
2. La ecuación que se propone relaciona la permeabilidad con el volumen de vacíos con aire de la mezcla compactada y algunos parámetros granulométricos de determinación rutinaria. Su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue 0,773 y su coeficiente C-p 7,0.
3. En cuanto a las condiciones de aplicabilidad de la ecuación, el modelo se determinó empleando valores de permeabilidad obtenidos en el laboratorio con el permeámetro Karol-Warner, sobre probetas cuyos vacíos con aire se calcularon a partir de las densidades halladas mediante el método de la probeta saturada y superficialmente seca (norma ASTM D2726). Todas las probetas correspondían a núcleos extraídos de pavimentos construidos, motivo por el cual los vacíos representan las características de compactación *in situ* de la mezcla.
4. Para la elaboración del modelo se emplearon 307 juegos de datos, tomados de dos investigaciones realizadas en los Estados Unidos de América: 287 pertenecen al proyecto identificado como NCHRP 9-27, llevado a cabo por un grupo de trabajo del Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto (13), y las 20 restantes provienen de un estudio efectuado por el Consejo de Investigaciones sobre el Transporte de la Universidad de Virginia (28). Los autores de la investigación NCHRP 9-27 desarrollaron una ecuación para predecir la permeabilidad a partir de los resultados de los ensayos realizados a 226 de las 287 probetas, ecuación que se identifica con el número 7 en este informe. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de esta ecuación fue 0,722, es decir, cinco centésimas inferior al que dio lugar al modelo recomendado en el presente estudio.
5. El hecho de que la confiabilidad de la ecuación obtenida en este estudio no sea mayor obedece a la existencia de factores insalvables por el momento, entre los cuales se pueden citar la falta de certeza sobre la saturación completa de la muestra y sobre la aplicabilidad de la ley de Darcy, las posibles pérdidas alrededor de la circunferencia de la probeta durante el ensayo, la imposibilidad de incluir en una fórmula elemental los efectos de la forma y de la textura de las partículas, etc.
6. La ecuación obtenida confirma que el contenido de vacíos con aire *in situ* es el factor de mayor impacto sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas. Le siguen en importancia, aunque a considerable distancia, los contenidos de llenante mineral y de arena fina.
7. La incidencia del tamaño máximo nominal del agregado (TMN) sobre la permeabilidad no quedó materializada en la ecuación propuesta. Esta ausencia obedece, en buena parte, al reducido número de tamaños máximos involucrados en los cálculos. Dentro del grupo de probetas analizado, sólo había tres TMN, y el 92% de las probetas tenía tamaños máximos nominales de 9,5 o 12,5 mm. Se debe anotar, por otra parte, que en los modelos elaborados en los cuales se incluyó el TMN, éste resultó inversamente proporcional a la permeabilidad, contrariando lo que menciona la literatura. En un estudio realizado por Cooley et al. (10), los autores concluyeron que las características de permeabilidad de las mezclas con TMN de 9,5 y 12,5 mm son muy similares. De hecho, si se observa la figura 2, tomada del estudio de Cooley, se aprecia que la curva correspondiente a 9,5 mm está ligeramente por encima de la de 12,5 mm, lo que explica la relación inversa encontrada en el presente estudio. La misma figura 2 permite advertir que el efecto verdaderamente notable sobre la permeabilidad se presenta cuando el TMN pasa de 12,5 a 19,0 mm.
8. Considerando el empleo cada vez mayor del dispositivo Corelok para calcular la densidad de las probetas compactadas (norma ASTM D6752), se desarrolló asimismo una ecuación para estimar la permeabilidad a partir de los valores de vacíos con aire determinados mediante dicha densidad (ecuación 10). La ecuación hallada mostró, también, un mayor nivel de aproximación a los valores reales que la obtenida en el proyecto NCHRP 9-27.
9. Comparando los resultados de las ecuaciones 9 y 10, no se pudo comprobar que los vacíos estimados a partir de la prueba Corelok dieran lugar a determi-

naciones más aproximadas de la permeabilidad que los vacíos de las probetas SSS, cuando las probetas presentan elevados porcentajes de vacíos con aire, contrariamente a lo que cita la literatura.

10. Aceptando los umbrales de permeabilidad que fija la literatura internacional para el tipo de ensayo con el cual se obtuvo la ecuación 9, se puede concluir que si las mezclas densas incluidas en el Artículo 450 de las especificaciones de construcción del Instituto Nacional de Vías se elaboran atendiendo las exigencias establecidas en éste, ellas no deberían presentar problemas asociados con la permeabilidad.

## REFERENCIAS

45. R. Christopher Williams, Brett Williams, Andrea Kvasnak, Brett Stanton & Tom Van Dam, "Development of Acceptance Criteria of Compacted Hot Mixture Asphalt Bulk Specific Gravity Based on Vacuum Sealed Specimens: Final Report", Final Report – Volume I, Michigan Technological University, October 2005.
46. R. Christopher Williams, "Early Permeability Test for Asphalt Acceptance", Center for Transportation Research and Education Iowa State University, Report N.º OR09-017, February 2009.
47. Eliana del Pilar Vivar & John E. Haddock, "HMA Pavement Performance and Durability", Report FHWA/IN/JTRP-2005/14, Purdue University, April 2006.
48. William R. Vavrik, Gerald Huber, William J. Pine, Samuel H. Carpenter & Robert Bailey, "Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design", Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, October 2002.
49. Robert Schmitt, Samuel Owusu-Ababio, James Crovetti & Allen L. Cooley, "Development of In-Place Permeability Criteria for HMA Pavement in Wisconsin", WHRP 06-15, University of Wisconsin, Platteville, February 2007.
50. Celestino Ruiz, Yolanda Rivara de Ronchi & Oscar M. Llano, "Sobre la estructura granular de las mezclas asfálticas convencionales", Decimonovena Reunión del Asfalto, páginas 99-130, Comisión Permanente del Asfalto, Entre Ríos, noviembre de 1975.
51. Celestino Ruiz, "Interpretación del Ensayo Marshall. Relación Estabilidad-Fluencia", Dirección de Vialidad, Provincia de Buenos Aires, Publicación N.º 57, La Plata, Argentina, mayo de 1966.
52. Instituto Nacional de Vías, "Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras", Bogotá, D.C., 2006.
53. Florida Department of Transportation, "Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Section 334, Superpave Asphalt Concrete", 2010.
54. Virginia Department of Transportation, "Road and Bridge Specifications, Section 211, Asphalt Concrete", Richmond, 2007.



# Evaluación de la rigidez axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural

## Axial stiffness analysis of high-density polyurethane foam sandwich panel specimens with external sheet in steel for structural use

**JAIRO URIBE ESCAMILLA**

Ingeniero civil, M.Sc., Ph.D. Profesor titular y director del Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales (Gimeci) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.  
jairo.uribe@escuelaing.edu.co.

Recibido: 10/01/2012 Aceptado: 12/02/2012  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

Se presentan los resultados de ensayos a carga axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. En un segundo artículo se mostrarán los resultados de ensayos a flexión de esos paneles. Dichas propiedades son necesarias para efectuar un análisis por elementos finitos de un modelo de viviendas para atender emergencias, como parte del proceso de homologación del diseño ante la Comisión Permanente del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

**Palabras claves:** paneles sándwich, propiedades mecánicas, vivienda de emergencia.

### Abstract

This article details the test results for rigid polyurethane foam sandwich panel specimens with external sheet in steel which were subjected to axial loads. In a second article, the results of flexural testing on such panels will be presented. The purpose was to determine their mechanical properties in order to carry out a finite element analysis on an emergency shelter design. This is part of the process of obtaining approval for the design from the Standing Commission on the Colombian Standards for Earthquake Resistant Constructions, NSR-10.

**Keywords:** sandwich panels, mechanical properties, emergency shelter.

## ANTECEDENTES

Los paneles conformados por láminas metálicas externas, adheridas a un núcleo de poliuretano de alta densidad, se utilizan ampliamente en muchos países como revestimiento de las paredes exteriores, como tejas o muros aislantes en divisiones internas. En general, dichos paneles se fijan mediante tornillos a un sistema estructural de miembros de concreto, acero o madera.

En años recientes se han efectuado diversas investigaciones en varias universidades del país para determinar las propiedades de los paneles producidos por Metecno de Colombia (refs. 1 a 3).

En abril de 2009, Metecno de Colombia solicitó al Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales (Gimeci), de la Escuela Colombiana de Ingeniería, realizar un estudio sobre la factibilidad de construir viviendas para la atención de emergencias con sus paneles Monowall y Techmet, y elementos de unión en lámina delgada diferentes de los sistemas estructurales tradicionales. Como este sistema constituye un régimen de excepción al no estar incluido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10 (ref. 4), es necesario hacer los estudios pertinentes para solicitar su homologación ante la Comisión Permanente creada por la Ley 400 de 1997.

## JUSTIFICACIÓN

De la información suministrada por Metecno de Colombia y de la búsqueda bibliográfica efectuada por los investigadores del proyecto, se concluyó que los paneles objetos de este estudio no se han utilizado en otros países como sistema estructural autónomo, por lo cual no se encontraron normas que gobernarán su diseño para este uso y que pudieran emplearse como base para la homologación.

Existen sí normas relacionadas fundamentalmente con su utilización como elementos de cerramiento y aislamiento, tales como la norma española (ref. 5), donde se prescriben ensayos que tienen que ver principalmente con su durabilidad y eficiencia en el uso respectivo.

## PROGRAMACIÓN

### Estudio de las viviendas propuestas

Después de un análisis cuidadoso y de considerar el tipo de uniones propuestas entre cubierta y muros, se optó

por estudiar las viviendas mostradas en las figuras 1 a 3, que reciben los nombres de Opción A con Monowall y Opción A con Metwall. Sus áreas son 36,48 y 38,00 m<sup>2</sup>, respectivamente.



Figura 1

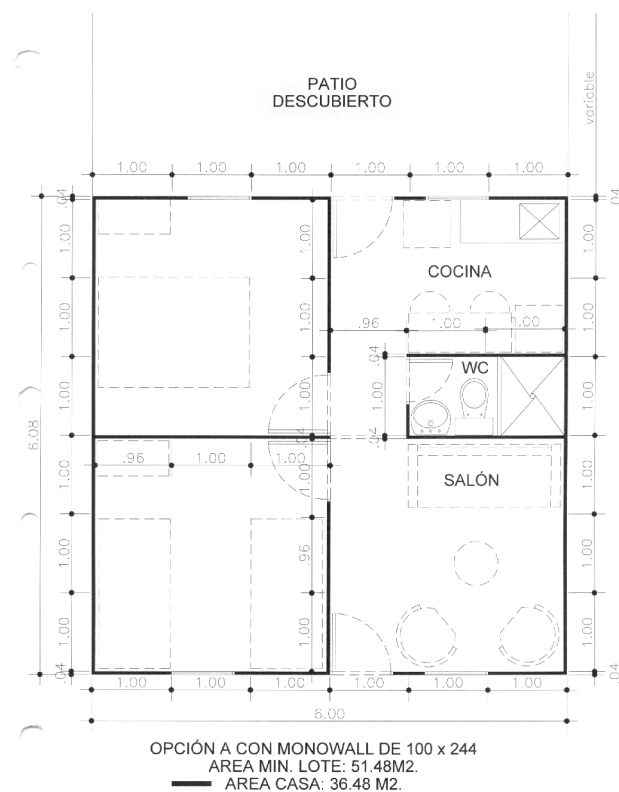


Figura 2

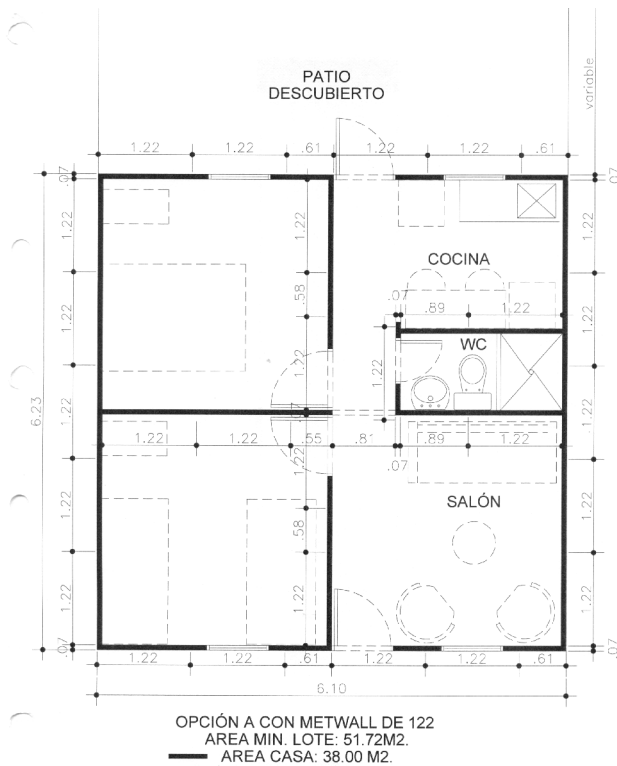


Figura 3

### Cargas y fuerzas que actúan sobre las viviendas

Las cargas y fuerzas que actuarán sobre las viviendas propuestas son de seis clases, pero para efectos de este estudio interesan fundamentalmente las cuatro primeras:

- Cargas gravitacionales: muerta y viva
- Fuerzas sísmicas
- Fuerzas eólicas
- Carga de granizo
- Efectos de temperatura
- Efectos de flujo plástico

Por tratarse de un país tropical y para la clase de uso que se les va a dar, se considera que la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior no será importante; por otra parte, el tipo de uniones propuestas permite que las edificaciones se acomoden fácilmente a las dilataciones o contracciones térmicas, por lo cual no se tomará en cuenta este efecto en el análisis de esfuerzos. Tampoco se considerará el efecto del flujo plástico del material de relleno.

En cuanto a las otras cargas, se utilizarán los valores prescritos en el título B del reglamento NSR-10 (ref. 4).

### Solicitaciones producidas por las cargas y fuerzas aplicadas

Las cargas y fuerzas aplicadas producen diferentes solicitaciones sobre: 1) los paneles; 2) los tornillos de sujeción, y 3) los elementos de unión. En el estudio se considerará primero el efecto sobre los paneles.

### Solicitaciones sobre los paneles

Según sea la localización del panel sobre el cual actúan, se producirán las solicitaciones indicadas a continuación:

- Cargas gravitacionales muerta y viva:* producen flexiones en los paneles de cubierta y compresión axial sobre los paneles de muro, tanto exteriores como interiores.
- Fuerzas sísmicas:* producen solicitaciones axiales horizontales en cada partícula de los paneles, tanto de cubierta como de cerramiento o división interna. A diferencia de los sistemas tradicionales, no puede suponerse que en un alto porcentaje actúa sobre la cubierta. Se considera que la cubierta debe actuar como un diafragma rígido para transmitir las fuerzas acumuladas a los muros, los que a su vez actúan como colectores que transmiten las fuerzas de corte generadas a la cimentación.
- Fuerzas eólicas:* producen presión o succión sobre los paneles de cubierta y de los muros exteriores. Si las ventanas y puertas están cerradas, que sería lo común con los vientos de diseño, no habría ni presión ni succión sobre los paneles interiores. Las presiones y succiones sobre la cubierta producen fuerzas axiales de compresión o tensión, así como empujes laterales sobre los muros de soporte. Las resultantes de estas fuerzas producen corte en los muros, que debe transmitirse a la cimentación y tensiones o compresiones sobre los tornillos que unen los paneles a las soleras de piso.
- Carga de granizo:* es una carga gravitacional que produce los mismos efectos señalados en el punto a).

### Metodologías de análisis

Por las características del sistema propuesto y por tratarse de un material compuesto, heterogéneo y anisotrópico, se decidió emplear dos metodologías aproximadas para el análisis, a saber: 1) por elementos finitos y 2) planteamiento interactivo. En este trabajo se presentan los estudios previos para poder aplicar el primero de ellos.

### Análisis por elementos finitos

Se utilizará el programa SAP 2000, versión 14.2.0 (ref. 6), suponiendo que el material tiene propiedades ortotrópicas y que los paneles están unidos con conectores simples cada cierto intervalo.

La determinación de las propiedades ortogonales de los paneles Monowall se hizo ensayando probetas pequeñas, sometidas a las siguientes sollicitaciones:

- a) Compresión simple
- b) Flexión

Tanto en el sentido de las nervaduras como en el sentido perpendicular a ellas.

A partir de dichos ensayos se evaluaron tanto la rigidez axial como las rigideces a flexión y a corte, según se describe más adelante.

Se utilizaron los valores característicos establecidos en la norma española UNE-EN 14509 (ref. 5), así:

“Para cada población de resultados de los ensayos, se debe determinar el valor medio y el 5% del valor de rotura, asumiendo un límite de confianza del 75%, según la norma internacional ISO 12491”.

El 5% del valor fractil debe usarse como el valor característico y determinado según la ecuación (A.33):

$$x_p = e^{(\bar{y} - k\sigma_y)} \tag{A.33}$$

en donde:

- $x_p$  es el 5% del valor fractil de la población  $x$ ;
- $y = L_n(x)$ .
- $\bar{y}$  es el valor medio de  $y$  (A.34).
- $k$  es el factor de rotura dado en la tabla A.4.
- $\sigma_y$  es la desviación estándar de  $y$ .

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_n(x_i) \tag{A.34}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_n(x_i) - \bar{y})^2} \tag{A.35}$$

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para poder analizar por el método de los elementos finitos el sistema de construcción prefabricada con paneles sándwich de láminas de acero y poliuretano, fue necesario determinar experimentalmente las propiedades del material compuesto mediante ensayos de compresión y de flexión en sentido paralelo y perpendicular a las nervaduras, con probetas estándar Monowall de 40 mm de espesor y Techmet de 25 mm. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con probetas de paneles Monowall sometidas a compresión axial, con la carga aplicada tanto en el sentido de las nervaduras como perpendicularmente a ellas.

#### Ensayos a compresión de probetas pequeñas

Para los ensayos a compresión se siguieron los procedimientos contenidos en la norma ASTM C 364-07: “Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions” (ref. 7). Se emplearon especímenes de 250 mm de ancho por 300 mm de altura y se denominaron con los nombres genéricos CA y CB para compresión paralela y perpendicular a la nervadura, respectivamente.

**Tabla A.4**  
Valor de rotura  $k$ , suponiendo un nivel de confianza del 75%

Número de probetas (n)	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	100
	3,15	2,68	2,46	2,34	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,93	1,87	1,80	1,76

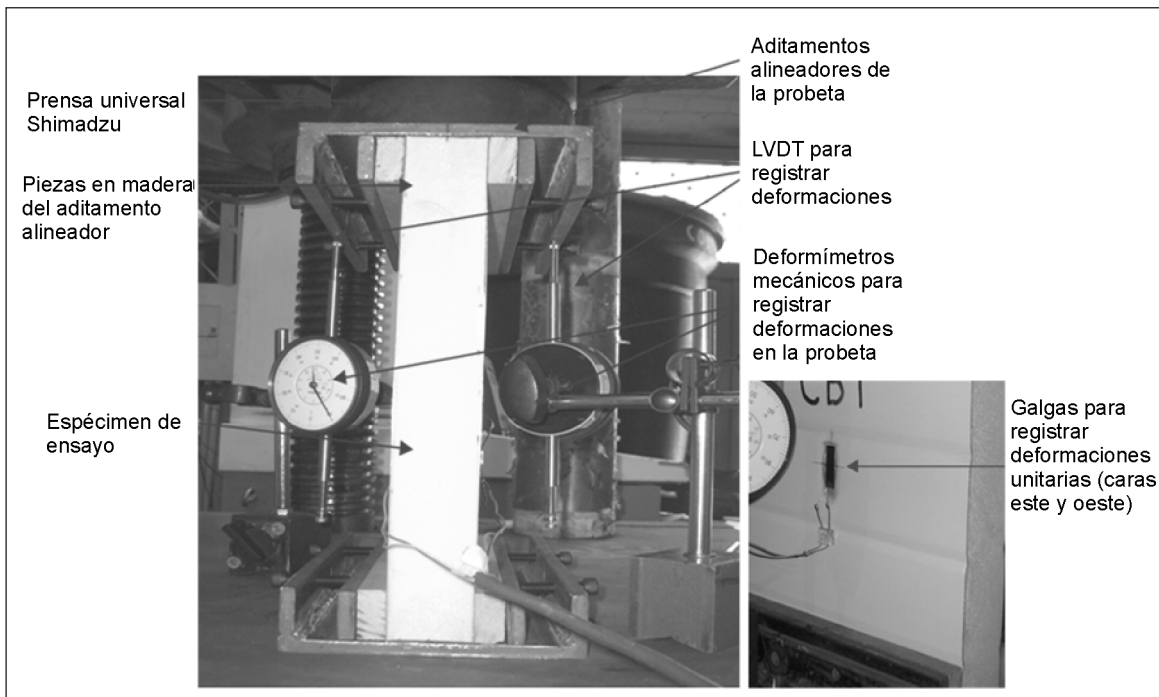


Figura 4 Instrumentación de probetas ensayadas a compresión.

Para la instrumentación de las muestras se utilizaron dispositivos electrónicos y mecánicos (figura 4). La carga se aplicó a una velocidad constante con una máquina universal Shimadzu, con capacidad de 1000 kN. Se trabajó en la escala de 50 kN. Para aplicar en forma adecuada la carga se emplearon dispositivos alineadores en los extremos de la probeta. Los alineadores permitían modificar por medio de tornillos la verticalidad de la probeta y mediante un procedimiento de tanteos se reducía la diferencia de deformaciones unitarias en las caras este y oeste a un valor aceptable.

Con la información obtenida se graficaron curvas *Carga vs. deformación* y a partir de ellas las de *Esfuerzo vs. deformación unitaria*. Se emplearon los valores promedio de las deformaciones en las caras este y oeste; por lo tanto, en todas las gráficas se tiene el valor promedio en las abscisas.

### Ensayos a compresión con la carga paralela a las nervaduras

A continuación se presentan las primeras de dichas curvas obtenidas para las probetas CA, ajustadas a ceros (figura 5).

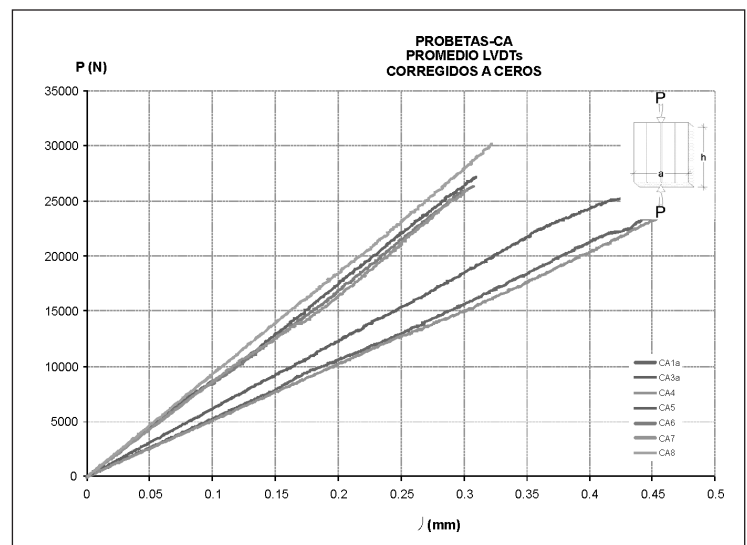


Figura 5 Curvas *Carga vs. deformación* corregidas de las probetas CA.

Cuando el espécimen falla, se presenta el desprendimiento de la lámina de acero en la zona central o en el tercio superior (figura 6).



Figura 6 Fallas típicas en las probetas CA.

Empleando las curvas *Carga vs. deformación* corregidas se calcularon la rigidez del elemento,  $K_A$ , y la carga máxima por unidad de ancho,  $P_{Am\acute{a}x}/a$ . Con las curvas de *Esfuerzo vs. deformación unitaria* se calcularon el esfuerzo máximo,  $\sigma_{Am\acute{a}x}$ , y el módulo de elasticidad,  $E_A$ .

Las probetas ensayadas en compresión paralela a la nervadura provenían de dos lotes de producción. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron análisis estadísticos para estimar la variación de los resultados y determinar cómo influía este hecho en los valores obtenidos. Los resultados para las muestras de los lotes 1 y 2, considerados en conjunto, se presentan a continuación (tabla 1). El mismo análisis, pero tomando en cuenta únicamente las probetas del lote 1, se muestra a renglón seguido (tabla 2).

Comparando las dos tablas se nota que al considerar sólo las probetas del lote 1 se reduce significativamente

la dispersión en la mayoría de los casos. Además, estas probetas tienen un comportamiento más homogéneo en las gráficas de respuesta, por lo que se decidió utilizar sólo estos valores para calcular los valores característicos con los cuales se efectuarían los cálculos del sistema estructural.

Para determinar dichos valores característicos se procedió, como se señaló antes, de acuerdo con la norma EN 14509/06, ref. 5. Los resultados se muestran más adelante (tabla 3).

### Ensayos a compresión con la carga perpendicular a las nervaduras

Para los ensayos en compresión perpendicular a la nervadura, probetas CB, se emplearon la misma instrumentación, el mismo sistema de aplicación de carga y los mismos procedimientos usados para las probetas CA.

Con los primeros resultados alcanzados se encontró que las deformaciones unitarias registradas con las galgas tenían un comportamiento errático y, en consecuencia, no serían útiles para el objeto del presente estudio. Probablemente esto se debe a la influencia de las nervaduras, que en esta orientación actúan como un pliegue y no como un rigidizador; por lo tanto, no se registró dicha información ni se dibujaron las correspondientes curvas *Esfuerzo vs. deformación unitaria*.

Tabla 1  
Análisis estadístico de resultados de todas las probetas CA

Valores estadísticos	$P_{Am\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{Am\acute{a}x}$ (MPa)	$P_{Am\acute{a}x}/a$ (kN/m)	$K_A$ (kN/mm)	$E_A$ (MPa)
Promedios	22,1	2,21	88,3	74,5	3567
Desviación estándar	4,66	0,47	18,6	18,5	391
Coefficiente de variación	21,1%	21,1%	21,1%	24,8%	11,0%

Tabla 2  
Análisis estadístico de resultados de las probetas CA del lote 1

Valores estadísticos	$P_{Am\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{Am\acute{a}x}$ (MPa)	$P_{Am\acute{a}x}/a$ (kN/m)	$K_A$ (kN/mm)	$E_A$ (MPa)
Promedios	23,4	2,34	93,6	81,4	3421
Desviación estándar	3,70	0,37	14,8	17,1	97,4
Coefficiente de variación	15,8%	15,8%	15,8%	21,1%	2,8%

Tabla 3  
Valores característicos probetas CA, compresión paralela a las nervaduras

Probetas	n	k	$P_{Am\acute{a}x_p}/a$ (kN/m)	$K_{A_p}$ (kN/mm)	$E_{A_p}$ (MPa)
CA4 a CA8	5	2,46	63,0	43,1	3189

Con los transductores lineales, *LVDTs*, y el registro de la máquina universal Shimadzu se obtuvieron las curvas *Carga vs. deformación* que se presentan a continuación (figura 7). Se observa que estas curvas tienen una tendencia bien definida y resultados homogéneos.

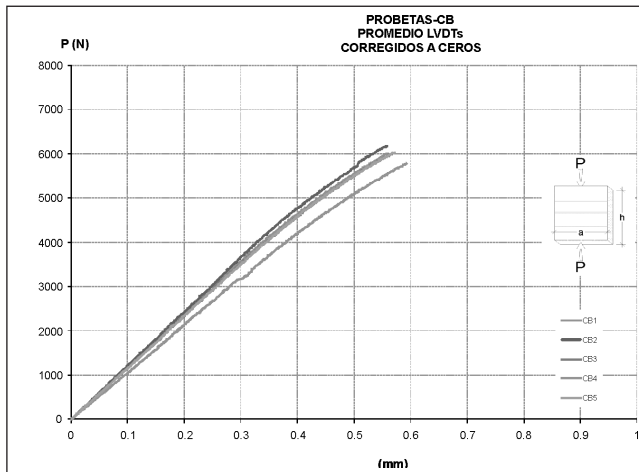


Figura 7 Curvas Carga vs. deformación corregidas, probetas CB.

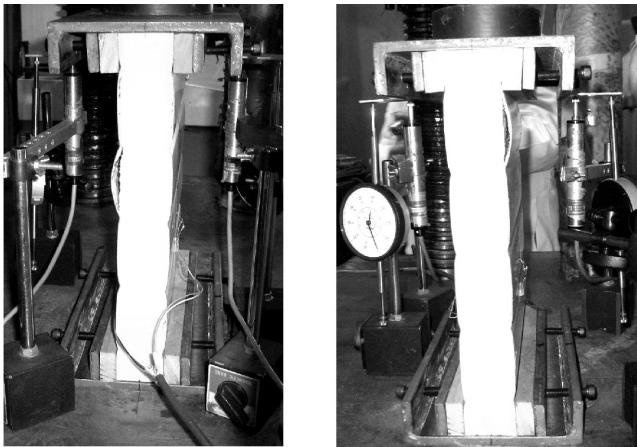


Figura 8 Fallas típicas de las probetas CB.

En la figura anterior se ilustran las fallas típicas de las probetas CB (figura 8).

Como se ve en dicha figura, para compresión perpendicular a las nervaduras se encontró que el poliuretano se desprendía de las láminas de acero entre dos nervaduras en los tercios superior y central de las probetas.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos para las probetas CB se presenta posteriormente (tabla 4).

Para el cálculo de los valores característicos se emplearon todos los resultados obtenidos y se procedió de acuerdo con la norma ISO 12491. Los valores característicos para compresión perpendicular a las nervaduras se presentan más adelante (tabla 5).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los resultados conduce a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Los paneles sándwich de espuma de poliuretano y revestimiento metálico se idearon fundamentalmente para servir como divisiones o cerramientos, con el fin de aislar un recinto dado. Se ha demostrado con el uso durante muchos años que ese papel lo desempeñan satisfactoriamente.
2. Dichos paneles, por su naturaleza, tienen una resistencia intrínseca para soportar diversas clases de solicitaciones. Con el objeto de analizar su comportamiento ante las cargas previstas para una vivienda, es necesario conocer sus propiedades mecánicas con un nivel de confianza adecuado que las normas han especificado como el fractil del 5%, con un nivel de confianza del 75%.

Tabla 4  
Análisis estadístico de resultados de las probetas CB

Valores estadísticos	$P_{B_{máx}}$ (kN)	$\sigma_{B_{máx}}$ (MPa)	$P_{B_{máx}}/a$ (kN/m)	$K_B$ (kN/mm)	$E_B$ (MPa)
Promedios	7,78	0,78	31,1	11,5	345
Desviación estándar	0,36	0,036	1,45	0,60	17,9
Coefficiente de variación	4,65%	4,65%	4,65%	5,18%	5,18%

Tabla 5  
Valores característicos probetas CB, compresión perpendicular a las nervaduras

Probetas	n	k	$P_{B_{máx p}}/a$ (kN/m)	$K_{B p}$ (kN/mm)	$E_{B p}$ (MPa)
CB1 a CB5	5	2,46	27,7	10,1	302

3. La capacidad para resistir carga axial de los paneles en el sentido perpendicular a las nervaduras es algo menos de la mitad de la que tiene en el sentido de ellas. mientras que la rigidez es aproximadamente la cuarta parte.
4. El módulo de elasticidad en el sentido perpendicular a las nervaduras es más o menos la décima parte del módulo de elasticidad en el sentido de ellas.
5. La dispersión obtenida en los resultados de los ensayos hechos en el sentido de las nervaduras es relativamente alta y casi el triple de la obtenida en los ensayos con carga perpendicular a las nervaduras. Por lo tanto, es importante utilizar probetas del mismo lote para evaluar los valores característicos y esta variabilidad se debe tener en cuenta en el diseño.
6. Los resultados de los ensayos hechos en probetas pequeñas sometidos a cargas axiales muestran valores lógicos que permiten aplicarlos en un análisis por elementos finitos.

## RECONOCIMIENTOS

El autor agradece a la empresa Metecno de Colombia por el patrocinio de esta investigación y a sus colaboradores: Nancy Torres Castellanos, Pedro Nel Quiroga Saavedra, Sebastián López Restrepo y Sandra Rocío Jerez Barbosa, coinvestigadores; Gloria González Espitia,

asistente, y los laboratoristas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en especial a José Ramón Torres Mejía.

## REFERENCIAS

1. *Ensayos de caracterización física y mecánica realizados sobre paneles prefabricados para la construcción de cubiertas y muros en viviendas*. Yamín, L. E. (2000). Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles (Cimoc). Bogotá: Universidad de los Andes.
2. *Análisis de la resistencia sísmica de un sistema estructural prefabricado de bajo peso para la construcción de viviendas*. Ruiz, D., Ochoa, Á., Castillo, G. & Robles, A. (2007). *Ingeniería y Universidad*, vol. 11, N.º 2. Bogotá: Universidad Javeriana.
3. *Ensayos cíclicos y estáticos para evaluar la resistencia sísmica de los muros y las conexiones de paneles livianos prefabricados para la construcción de viviendas*, Ruiz, D., Martínez, S., Herrera, S. & Riveros, M. (2009). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, N.º 75, julio - septiembre. Bogotá.
4. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10* (2010). Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, publicado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Bogotá.
5. *Norma española UNE-EN 14509: Paneles sándwich aislantes autoportantes de doble cara metálica. Productos hechos en fábrica. Especificaciones* (2007). Asociación Española de Normalización y Certificación (Aenor). Madrid.
6. *SAP 2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Program* (2011). Computers & Structures, Inc. Berkeley, CA, EE.UU.
7. *Norma ASTM C 364-07: "Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions"* (2007). American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU.



# Algoritmo basado en una red inmune artificial para la alineación de patrones de puntos

## An artificial immune network based algorithm for point pattern matching

**MANUEL IGNACIO CUADRADO MORAD, WILFREDO ARIEL GÓMEZ BUENO, MPE. HENRY ARGÜELLO FUENTES**

Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GILB), Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander

manuelqadrado@gmail.com, wiargobu@gmail.com, henarfu@uis.edu.co.

Recibido: 15/01/2012 Aceptado: 08/02/2012

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

### Resumen

La alineación de puntos es un proceso que consiste en encontrar la correspondencia entre dos patrones de puntos, buscando la alineación óptima entre ellos. El emparejamiento de patrones tiene aplicaciones en las áreas de visión artificial y reconocimiento de patrones.

En este artículo se propone un algoritmo basado en un modelo de red inmune artificial, usando como función de aptitud una versión modificada de la distancia parcial de Hausdorff, la cual permite encontrar la mejor transformación geométrica que relaciona ambos patrones de puntos.

El algoritmo propuesto se probó experimentalmente para evaluar su efectividad y velocidad de convergencia, obteniendo resultados satisfactorios.

Aunque dicho algoritmo puede aplicarse a patrones de puntos definidos en espacios n-dimensionales, en este trabajo sólo se presentan resultados para conjuntos de puntos en dos dimensiones, y transformaciones geométricas que contemplan traslaciones, rotaciones y escalamiento.

**Palabras claves:** alineación de patrones de puntos, Hausdorff, red inmune artificial, optimización.

### Abstract

Point matching is a process that consists in finding the correspondence between two point patterns looking for the optimal alignment of both of them. Pattern matching has applications in areas such as computer vision and pattern recognition.

This article puts forward an artificial immune network based algorithm, using a modified version of the partial Hausdorff distance as a fitness function, from which the best geometric transformation relating both point sets is found.

The proposed algorithm was experimentally tested in order to evaluate its effectiveness and convergence speed, obtaining good results.

Although the proposed algorithm can be applied to n-dimensional point patterns, this article presents results only for two-dimensional point sets and for geometric transformations that consist on translations, rotations, and scaling.

**Keywords:** point pattern matching, Hausdorff, artificial immune network, optimization.

## INTRODUCCIÓN

Encontrar la correspondencia entre dos patrones de puntos arbitrarios es una tarea frecuente en las áreas de visión artificial y reconocimiento de patrones. De manera formal, este problema se resume así:

“Dados dos conjuntos de puntos definidos en el espacio  $R^n$ , se necesita determinar si existe una transformación geométrica dentro de un grupo de transformaciones definidas, que haga corresponder con la mayor aproximación posible al primer conjunto con el segundo conjunto de puntos”.

Un modo de resolver este problema es abordándolo desde la perspectiva de los algoritmos de búsqueda y optimización. Existen numerosos trabajos [1], [2], [3], [4] en los que se emplean algoritmos evolutivos, como los algoritmos genéticos, o algoritmos de ramificación y poda, para lidiar con el problema de emparejamiento de patrones de puntos.

En el presente trabajo se propone usar un tipo de algoritmos bioinspirados [9][10], conocidos como sistemas inmunes artificiales; en especial se emplea un modelo de red inmune artificial, que tiene como objetivo encontrar, dentro de un espacio de transformaciones geométricas, aquella transformación que alinee dos conjuntos de puntos arbitrarios y maximice la correspondencia entre ambos patrones.

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### Sistemas inmunes artificiales

Los sistemas inmunes artificiales son sistemas adaptativos inspirados en las teorías inmunológicas y las funciones, principios y modelos desarrollados a partir del estudio del sistema inmunitario de los vertebrados, los cuales son trasladados a los sistemas computacionales con el fin de resolver problemas en áreas como la informática, matemáticas e ingeniería.

Entre los sistemas inspirados en el sistema inmunitario se destacan los algoritmos de selección negativa [5], [6], selección clonal [7] y las redes inmunes artificiales [8]. Este último tipo de algoritmo se detallará a continuación.

### Redes inmunes artificiales

Entre las numerosas aplicaciones de los sistemas inmunes artificiales, una de las que más atención han

despertado en años recientes es la optimización de funciones [8]. Con base en ese interés se han desarrollado algoritmos denominados redes inmunes artificiales, que se fundamentan en las teorías de redes inmunes desarrolladas por Jerne [9] y Perelson [10], las cuales plantean el sistema inmunitario como una red de células y explican la dinámica interna de la respuesta inmune y la “memoria” del mismo sistema, que está presente cuando el organismo es atacado por agentes externos conocidos como antígenos.

Las redes inmunes artificiales se han implantado para llevar a cabo tareas diversas, como análisis de datos, clasificación, reconocimiento de patrones y optimización.

En este trabajo se implementó una red inmune artificial basada en la familia de redes inmunes conocida como aiNet [11], desarrollada por De Castro [7,11], orientada inicialmente al análisis de datos y modificada después para realizar tareas de optimización de funciones multimodales [12], [13]. En esta familia de redes inmunes también se destacan los desarrollos de De França [14], en los cuales se hicieron mejoras al modelo básico y se extendió el campo de acción para lidiar con problemas de optimización multimodal en ambientes dinámicos.

Una red inmune artificial orientada a la optimización de funciones se puede definir como un procedimiento evolutivo basado en la mutación de una población de tamaño dinámico, cuyos elementos representan células del sistema inmunitario.

El procedimiento de una red inmune artificial consiste en:

1. Inicializar una población aleatoria de individuos. Cada individuo de la población corresponde a una célula del sistema inmune que se conoce como linfocitos y que se codifican como vectores  $n$ -dimensionales de elementos reales, según las características del problema y la función que se busca optimizar.
2. Cada elemento de la población se evalúa frente a una función objetivo que mide la aptitud de la célula. Dicha función es una analogía a un antígeno externo que ha ingresado al sistema y que debe neutralizarse. El objetivo principal de la red inmune es desarrollar al menos una célula (valores) que posea la suficiente aptitud para eliminar a dicho anticuerpo (que maximicen la función objetivo).

3. Luego de su evaluación, cada célula genera un número de clones o copias exactas de sí misma.
4. Después se somete a los clones a un proceso de hipermutación inversamente proporcional a la aptitud de la célula madre, con el objetivo de mejorar la población, explorando el espacio de soluciones.
5. Paralelo a esta dinámica se ejecutan procesos de nacimiento de nuevas células que se incorporan al repertorio y la muerte de células que no hayan sido lo suficientemente estimuladas (baja aptitud); de igual forma cada cierto periodo se mide la afinidad entre todas las células, con el fin de evitar redundancia dentro de la población; esto se realiza calculando la distancia euclidiana entre los vectores que representan a las células y suprimiendo elementos cuando se presenten células similares (figura 1).

**Función**

```

C=OptaiNet(Nc, iniCell, div, σ, maxgen, maxcell,
maxedad)
C=generar_Cell(iniCell)
Mientras (no se alcance una condición de
parada)
Haga
Para cada celula c del repertorio C
c.apt=evaluar_cell(c)
C'=clonar(c, Nc, apt*)
C'=mutar(C', apt*)
c*=seleccionar mejor clon(C*)
Si c* es mejor que c
c=c*
c.edad=0
Sino
c.edad=c.edad+1
Fin
Si la edad de la célula es mayor a
maxedad
Muerte_por_apoptosis(c)
Fin
Fin
Si el error promedio de todo el
repertorio no se ha estancado
Retorne al inicio del ciclo
Sino
Supresión_celular(C, ▣)
C=[C;generar_Cell(iniCell*div)
Fin
Si el tamaño del repertorio es mayor a
max_cell
Suprimir_celulas_no_estimuladas(C)
Fin
Fin
Fin

```

Figura 1 Algoritmo de red inmune Artificial implementado en el presente trabajo.

## RED INMUNE ARTIFICIAL PARA EL PROBLEMA DE EMPAREJAMIENTO DE PUNTOS

Considere el problema de emparejamiento de patrones como: dados dos conjuntos de puntos

$$P = \{p_i ; p_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

y

$$Q = \{q_j ; q_j \in R^n, j = 1, 2, \dots, k\} \quad (2)$$

Una transformación  $q_j = F(p_i)$  entre  $q_j$  y  $p_i$  puede escribirse como:

$$Q = s * R * P + T \quad (3)$$

Donde  $s$  representa el factor de escala,  $R$  la matriz de rotación:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\theta$  es el ángulo de rotación, y  $T = [t_x \ t_y]^T$  es el vector de traslación, con  $t_x$  representando el desplazamiento horizontal y  $t_y$  el desplazamiento vertical. El problema de emparejamiento se enfoca en encontrar la función óptima para alinear ambos conjuntos de puntos y maximizar la correspondencia entre los elementos.

### Parámetros de la red

Tabla 1  
Parámetros de la red inmune artificial

Parámetro	Descripción
<i>ini_Cell</i>	Número inicial de células.
<i>Nc</i>	Número de clones generados por cada célula.
<i>div</i>	Porcentaje de nuevas células que ingresan al repertorio.
<i>max_gen</i>	Número máximo de generaciones o ciclos.
<i>max_cell</i>	Número máximo de células.
<i>max_edad</i>	Límite de vida de una célula antes de ser suprimida por apoptosis (muerte celular).

### Inicialización y representación

Los parámetros que se necesitan estimar son  $s$ ,  $\theta$ ,  $t_x$  y  $t_y$ , los cuales definen una transformación geométrica que contempla escalado, rotación y traslación en ambos ejes. Cada parámetro se define dentro de un intervalo; es así como para el caso de dos dimensiones, cada célula está representada por un vector real de cuatro componentes. Cada componente de dicho vector se inicializa de manera aleatoria dentro de los límites en los que está definido ese componente.

### Función de aptitud

Dados dos conjuntos de puntos  $A$  y  $B$ , la distancia de Hausdorff se define como:

$$H(A,B) = \max (b(A,B), b(B,A)) \tag{5}$$

Donde

$$b(A,B) = \max (\min \| a - b \|); a \in A \text{ y } b \in B \tag{6}$$

$\| * \|$  Representa la distancia entre  $a$  y  $b$ . La función  $b(A,B)$  es conocida como la distancia directa de Hausdorff entre  $A$  y  $B$ , e identifica el punto  $a_i \in A$  que está más lejos de cualquier punto de  $B$ . Es así como la distancia de Hausdorff es una medida de disimilitud entre dos conjuntos de puntos, calculando la distancia del punto en  $A$  que se encuentra más lejos del conjunto  $B$  y viceversa.

La distancia directa de Hausdorff se ha utilizado en numerosos trabajos referentes a registro de imágenes y patrones [15], [16]; es muy sensible a ruido y puntos espurios, dado que la distancia tomará valores muy grandes ante la presencia de puntos externos, aunque los conjuntos coincidan. A causa de esto se han evaluado modificaciones a la fórmula general [17], [18], buscando siempre una medida de mayor rendimiento que sea tolerante al ruido; una de esas modificaciones se define como la distancia parcial de Hausdorff, que en vez de tomar la máxima de las mínimas distancias, las organiza primero en orden ascendente y usa un percentil para tomar el valor que ocupe la  $k_{ésima}$  posición:

$$b_k(A,B) = k_{ésima} \min \| a - b \|; a \in A \text{ y } b \in B \tag{7}$$

En el presente trabajo se utilizó como medida de aptitud una versión modificada de la distancia parcial de Hausdorff [19], que emplea dos percentiles para dar mayor robustez a la medición. La distancia parcial modificada de Hausdorff (MPHD) se define como:

$$b_{ki}(A,B) = \frac{1}{N_{ki}} \sum_{m=k}^i \min \| a - b \|; a \in A \text{ y } b \in B \tag{8}$$

$$H(A,B) = \max (b_{ki}(A,B), b_{ki}(B,A)) \tag{9}$$

Donde  $N_{ki}$  es el número de puntos entre las posiciones  $k$  y  $i$ , y  $b_{ki}(A,B)$  se obtiene calculando el promedio de distancias que se encuentran entre la posición  $k$  y la posición  $i$ .

### Operadores de mutación

En la red inmune se utilizaron dos operadores de mutación, que siguen la premisa de que el factor de mutación está relacionado con la aptitud de cada célula.

El primer operador define el número de mutaciones a las cuales se somete una célula, que es inversamente proporcional a la aptitud de dicha célula. Los mejores individuos son modificados en menor medida que aquellos que poseen poca aptitud, con el propósito de realizar búsquedas locales en el espacio de soluciones.

El segundo operador de mutación que se utiliza es el propuesto por De França [14] en su modelo de red inmune, en el cual realiza mutaciones gaussianas pero en una dimensión a la vez, con el propósito de explorar el espacio que rodea a la célula; este tipo de mutación se aplica a todas las células en igual medida.

### Tamaño de la población

Debido a que las redes inmunes pueden lidiar con problemas de optimización multimodales, en casos donde la función que se va a optimizar tiene un gran número de puntos óptimos, el repertorio de células podría expandirse a un número de elementos muy elevado y causar un excesivo uso de los recursos de memoria, haciendo más lenta la convergencia del procedimiento; para lidiar con esto, en las redes inmunes se predefine un máximo número de células presentes en el repertorio;

al ser sobrepasado dicho límite, un porcentaje de las “peores” células se descarta del repertorio.

**Condiciones de parada**

Las condiciones de parada determinan en gran medida qué tan buena es una solución encontrada; las redes inmunes han demostrado tener muy buena convergencia; y en este trabajo las condiciones de parada que se usaron son: 1) cuando la aptitud de la mejor célula no se modifica durante *n* ciclos; 2) cuando la población de células se estabiliza en un valor determinado, y 3) cuando se ha sobrepasado el límite de generaciones predefinidas.

**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

**Pruebas con patrones aleatorios**

El algoritmo se probó en diversos escenarios, generando patrones aleatorios y aplicándoles transformaciones geométricas definidas; de igual forma, se consideraron casos donde se presentan ruido, puntos faltantes y puntos espurios.

Los parámetros de la transformación [*t<sub>x</sub>*, *t<sub>y</sub>*, *θ*, *s*] aplicada a los patrones se establecieron en:

$$[-90 \ 50 \ 30 \ 1,1] \quad (10)$$

Los porcentajes de puntos espurios y faltantes se fijaron en 25%.

Los escenarios en los cuales se generaron los patrones consistieron en:

- **Escenario 1.** En este caso, el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1.

$$Patrón2 = T(Patrón1) \quad (11)$$

- **Escenario 2.** En este caso, el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1, y además de esto se adicionan puntos que no pertenecen al patrón original.

$$Patrón2 = T(Patrón1) + puntos\ espurios \quad (12)$$

- **Escenario 3.** En este caso, el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón

1, y aparte de esto se sustraen elementos del patrón original.

$$Patrón2 = T(Patrón1) - puntos\ faltantes \quad (13)$$

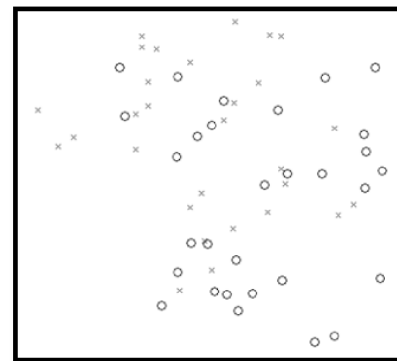
- **Escenario 4.** En este caso, el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1, y fuera de esto se presentan distorsiones en las coordenadas de los puntos que conforman los patrones.

$$Patrón2 = T(Patrón1) + ruido \quad (14)$$

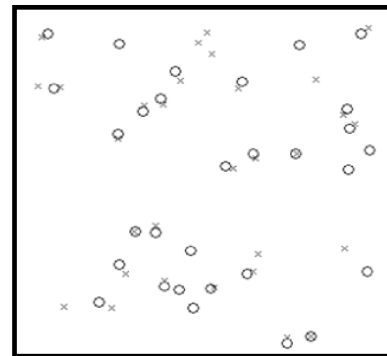
- **Escenario 5.** Este caso es una combinación de todos los escenarios anteriores, incorporando distorsiones y elementos faltantes y espurios.

$$Patrón2 = T(Patrón1) + ruido + puntos\ espurios - puntos\ faltantes \quad (15)$$

A continuación se muestran los resultados gráficos para el caso 5, que incorpora características de todos los demás casos (figura 2 a).



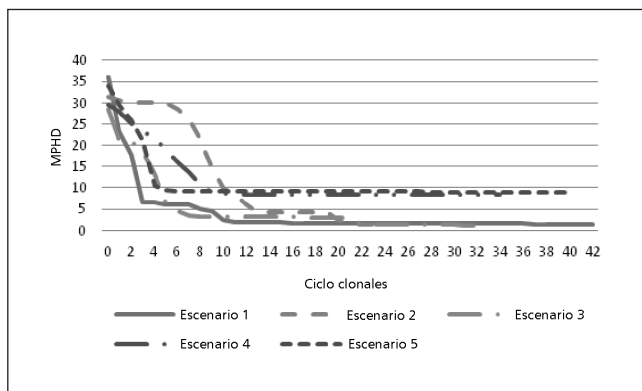
a)



b)

**Figura 2** a) Patrones de puntos antes de la alineación; b) Alineación de los patrones luego de usar la red inmune artificial. o) Distribución de puntos generada; x) Distribución de puntos de la red inmune.

Para hacer una comparación entre escenarios se verificó la evolución de cada uno a lo largo de los ciclos clonales (figura 3).



**Figura 3** Convergencia de la red inmune en los cinco casos de prueba. Evolución del valor de la distancia parcial modificada de Hausdorff (MPHD) a lo largo de los ciclos clonales.

Se estimó el error entre las transformaciones generadas o iniciales y las transformaciones resultantes del proceso de alineación de patrones:

$$Et = (T_{Inicial} - T_{Encontrada}) / 100 \quad (16)$$

y el MPHD para diferentes cantidades de puntos en cada uno de los cinco escenarios, se halló la media y se obtuvo lo siguiente (tabla 1).

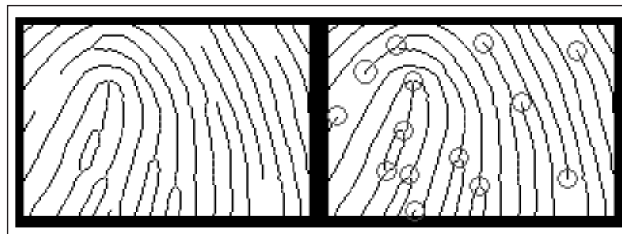
**Tabla 1**  
Resultados obtenidos de las pruebas de alineación de patrones de puntos generados aleatoriamente

N.º de puntos	Escenario	Promedio	
		MPHD	Error
30	1	3,54	2,3
	2	4,21	2,3
	3	3,78	2,1
	4	11,77	5,0
	5	14,15	4,1
50	1	3,86	2,4
	2	4,48	2,5
	3	4,28	2,1
	4	11,88	4,9
	5	14,23	4,6
100	1	3,64	2,3
	2	4,04	2,1
	3	6,26	6,5
	4	11,15	4,3
	5	12,63	6,3

Se efectuaron pruebas con patrones generados aleatoriamente en cinco escenarios diferentes para tres cantidades diferentes de puntos, obteniendo resultados satisfactorios con un error máximo del 6,5%.

### Pruebas con imágenes de huellas dactilares

En el área de la biometría, el problema de emparejamiento de puntos cumple un papel fundamental; al comparar huellas dactilares, se busca encontrar similitudes en puntos específicos de las huellas llamadas minucias, que se definen como puntos singulares donde una cresta dactilar termina o se bifurca. En el campo de reconocimiento de huellas dactilares, se busca alinear las huellas con el fin de maximizar la correspondencia de puntos singulares y así determinar si dos muestras pertenecen al mismo individuo [20]. Para estas pruebas se utilizó una base de datos empleada en la competencia de verificación de huellas (FVC2004) [21]; las imágenes se procesaron y las minucias se extrajeron y almacenaron, para posteriormente comparar las diversas muestras y verificar la eficiencia del algoritmo en la comparación de huellas dactilares.



**Figura 4** Minucias en una huella dactilar.

En las huellas dactilares, los patrones de puntos presentan todo tipo de distorsiones y ruido, al igual que oclusiones que conducen a minucias faltantes, y en otros casos durante la etapa de procesamiento aparecen falsas minucias. Todo sistema de comparación de huellas debe lidiar con estos inconvenientes.

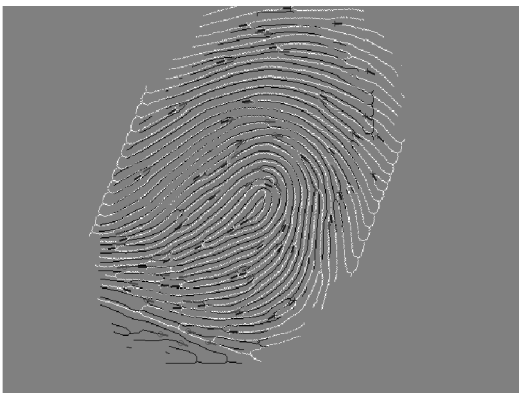
En las figura 5, 7 y 9 se observan algunos ejemplos de alineación realizados por el algoritmo, en los cuales es posible visualizar las diferentes calidades que presentaban las imágenes de las huellas que se pretendían alinear.

Las figuras 6, 8 y 10 corresponden a los resultados de alineación de los ejemplos anteriores, los cuales

muestran cómo las crestas y los puntos característicos se corresponden entre ambas imágenes. Los resultados son satisfactorios, lo que demuestra la efectividad del algoritmo y su tolerancia a las diferencias de calidad entre las imágenes.



**Figura 5** Ejemplo 1: dos muestras de la misma huella; nótese la diferencia entre la posición y la orientación en ambas imágenes.



**Figura 6** Muestras de la figura 4 luego de ser alineadas usando la red inmune artificial.



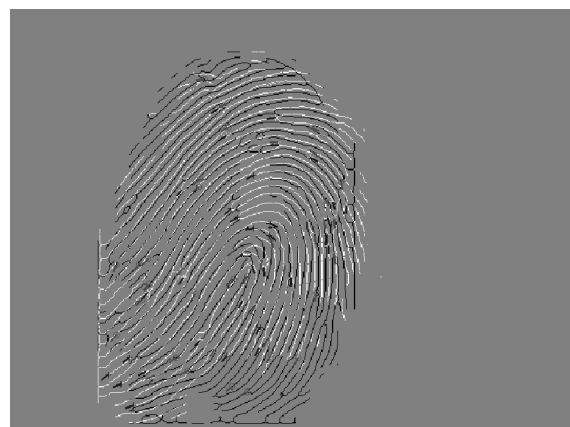
**Figura 7** Ejemplo 2: dos muestras de la misma huella, con diferentes calidades debido a la mala colocación del dedo sobre el sensor.



**Figura 8** Muestras de la figura 7 luego de ser alineadas usando la red inmune artificial.



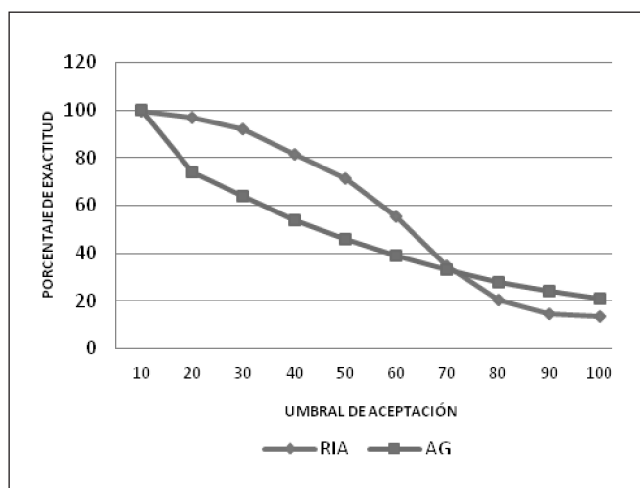
**Figura 9** Ejemplo 3: dos muestras de la misma huella, con diferentes calidades de adquisición.



**Figura 10** Muestras de la figura 9 luego de ser alineadas usando la red inmune artificial.

Para evaluar la exactitud del algoritmo fue necesario comparar los resultados con un algoritmo que, al igual que el desarrollado en este trabajo, estuviera basado en un procedimiento poblacional evolutivo y que hiciera uso de la misma base de datos que se utilizó para probar la red inmune. El trabajo con el que se comparó el procedimiento es el desarrollado por Pires, Duarte y Gonzaga en [22].

En la figura 11 se observan los resultados de la comparación, en los cuales se ve que el algoritmo desarrollado en el presente artículo es superior al algoritmo genético del desarrollo de Pires, Duarte y Gonzaga en [22], a partir de un umbral de aceptación del 70%.



**Figura 11** Comparación entre la exactitud de la red inmune artificial (RIA) y un algoritmo genético (AG) en el proceso de verificación de huellas.

## CONCLUSIONES

En este artículo se propone un algoritmo basado en una red inmune artificial, el cual utiliza como medida de aptitud y similitud una versión modificada de la distancia parcial de Hausdorff para resolver el problema de emparejamiento de patrones de puntos. El método propuesto puede alcanzar una rápida convergencia, que simboliza una alta eficiencia y produce buenos resultados. Se hicieron pruebas con patrones de puntos generados y con patrones de puntos pertenecientes a huellas dactilares de una base de datos internacional, y los resultados demuestran que la aproximación inmune realizada en el presente artículo es competitiva para ambos casos, y pudiese tenerse en cuenta en aplicaciones

relacionadas con alineación de patrones de puntos en el campo real.

## REFERENCIAS

- [1] Zhang Lihua, Xu Wenli & Chang Cheng (2003, January). Genetic algorithm for affine point pattern matching. *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, N.º 1-3, pp. 9-19.
- [2] Ansari Nirwan, M.H. Chen & Hou, E.S.H. Point pattern matching by a genetic algorithm. In *Proceedings of the 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronic Society (Iecon'90)*, vol. II, pp. 1233-1238.
- [3] Tico, Marius & Rusu, Corneliu (1998). Point pattern matching using a genetic algorithm and Voronoi tessellation. In *Proc. of 9th European Signal Processing Conference (Eusipco)*, vol. 3, pp. 1589-1592, Rhodes, Greece, 8-11 Sept. H. Poor (1985). *An Introduction to Signal Detection and Estimation*. New York: Springer-Verlag, ch. 4.
- [4] Murtagh, F. (1992). *A New Approach to Point Pattern Matching*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, in press.
- [5] Ji, Zhou & Dasgupta, Dipankar (2006). Negative selection algorithms: from the thymus to v-detector, The University of Memphis.
- [6] Forrest, S., Perelson, A.S., Allen, L. & Cherukuri, R. (1994). Self-nonsel discrimination in a computer. *Proceedings of the 1994 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy*. Los Alamitos, CA, pp. 202-212.
- [7] De Castro, L. N. & Von Zuben, F. J. (2002). Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems*, 6(3), pp. 239-251.
- [8] Galeano, J., Veloza, A. & González, F. (2005). A comparative analysis of artificial immune network models. In *Proceedings of the 2005 Conference on Genetic and Evolutionary Computation (Gecco'05)* (Washington DC, USA, June 25-29), pp. 361-368. New York, NY: ACM Press.
- [9] *Towards a Network Theory of the Immune System* (1974). N. K. Jerne; *Ann. Immunol. (Inst. Pasteur)*, 125C, 373-389.
- [10] Farmer, J.D., Packard, N. & Perelson, A. (1986). The immune system, adaptation and machine learning. *Physica D*, vol. 2, pp. 187-204.
- [11] De Castro, L. N. & Von Zuben, F. J. *aiNet: An Artificial Immune Network For Data Analysis*. Book chapter in *Data Mining: A Heuristic Approach*. H. A. Abbass, R. A. Sarker & C.S. Newton (eds.). Idea Group Publishing, USA, chapter XII, pp. 231-259.
- [12] De Castro, L. N. & Timmis, J. I. *An Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization*. In *Proceedings of IEEE CEC'02*, 1, pp. 699-674.
- [13] Timmis, Jon & Edmonds, Camilla (2004). A Comment on Opt-AiNET: An Immune Network Algorithm for Optimisation. *Gecco* (1), pp. 308-317.
- [14] De França, F. O., Von Zuben, F. J. & De Castro, L. N. (2005). Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization on Dynamic Environments. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference, Gecco-2005*. Washington. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Gecco-2005*. New York: ACM Press.
- [15] Sun, Chao & Cai, Ronghai (2009). Document Image Registration Using Geometric Invariance and Hausdorff Distance. *Etc*, vol. 2, pp. 725-728. First International Workshop on Education Technology and Computer Science.



- [16] Li, Hua, Lin, Ying & Wang, Anna(2008). An Medical Image Registration Approach Using Improved Hausdorff Distance Combined with Particle Swarm Optimization. *Icnc*, vol. 5, pp. 428-432. Fourth International Conference on Natural Computation.
- [17] Dubuisson, M. & Jain, A.K. A Modified Hausdorff Distance for Object Matching. *Proc. Intl Conf. Pattern Recognition*, pp. 566-568.
- [18] Zhang, Jian-Wei, Han, Guo-Qiang & Wo, Yan (2005). Image registration based on generalized and mean Hausdorff distances. *Machine Learning and Cybernetics. Proceedings of 2005 International Conference*. 18/09/2005; 8:5117- 5121, vol. 8.
- [19] Tian, Li, Kamata, Sei-ichiro, Ueshige, Yoshifumi & Kuroki, Yoshimitsu (2005, July). An automatic image-map registration using partial Hausdorff distance. *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 3534-3537.
- [20] Maltoni, David, Maio, Dario, Jain, Anil & Prabhakar, Salil (2003). *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York: Springer.
- [21] FVC2004: the Third International Fingerprint Verification Competition. <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>.
- [22] Pires, M. G., Duarte, F. V. & Gonzaga, A. (2006). Genetic Optimization for Fingerprint Verification. In *Proceedings of XIX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing - Sibgrapi*.

# Identificación modal a partir de vibraciones ambientales para puentes peatonales metálicos por medio de la metodología NExT/ERA

## Ambient vibration based modal identification of steel pedestrian bridges using the NExT/ERA technique

**ANDRÉS OSWALDO ZABALA MEJÍA<sup>1</sup>, JUAN CARLOS GUTIÉRREZ RUIDÍAZ<sup>2</sup>, DANIEL RUIZ VALENCIA<sup>3</sup>**

1. Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. E-mail: azabala@javeriana.edu.co.

2. Estudiante de ingeniería civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

3. Ingeniero civil, M.Sc., jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, profesor asociado e investigador del grupo Estructuras y Construcción, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana. jcgutierrez@javeriana.edu.co, jcgutierrez@javeriana.edu.co, daniel.ruiz@javeriana.edu.co

Recibido: 20/10/2011 Aceptado: 14/01/2012

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

### Resumen

En Colombia es poca la investigación realizada sobre caracterización modal experimental de estructuras. A partir de técnicas numéricas aplicadas sobre registros de vibración ambiental, es posible obtener las propiedades dinámicas de sistemas estructurales (frecuencias y modos de vibración).

En este artículo se presenta la implementación de la metodología NExT-ERA para la identificación de las propiedades modales de dos puentes peatonales pertenecientes al sistema de transporte Transmilenio. Los resultados de NExT-ERA en frecuencia se comparan con los obtenidos mediante una modelación por elementos finitos de los puentes, arrojando resultados bastante cercanos (diferencia promedio del 3,5%).

**Palabras claves:** sistemas estructurales, propiedades dinámicas, frecuencias de vibración, técnica NExT/ERA.

### Abstract

Research on experimental modal characterization of structural systems in Colombia is very limited. The dynamic properties of structural systems (frequency and vibration modes) can be obtained by using detailed numerical techniques on ambient vibration. This article shows the modal identification of two pedestrian bridges (of the Transmilenio system) using the NExT-ERA technique. The methodology was applied to free field time history records. The frequencies obtained with NExT-ERA were compared with the frequencies obtained with a finite element model, and both methods present similar results (average difference of 3.5%).

**Keywords:** structural systems, dynamic properties, vibration frequencies, NExT/ERA technique.

## INTRODUCCIÓN

Existen diferentes factores de afectación a cualquier obra civil debido a vibraciones inducidas por fuentes ambientales o por la misma actividad del hombre. Ejemplo de esto son las vibraciones producidas por tráfico, por actividad industrial, por fenómenos naturales (sismos o movimientos de tierras) o por actividades relacionadas con obras civiles, tales como el hincado de pilotes.

Una de las estructuras que a diario utiliza la población de la capital colombiana son los puentes peatonales, los cuales son de vital importancia para el sistema de transporte masivo Transmilenio. Lo ideal sería que estos sistemas estructurales tuvieran un comportamiento dinámico especial, en el cual los efectos de las vibraciones de la estructura fuesen imperceptibles para los usuarios o, en el peor de los casos, tolerable por éstos. Por desgracia, esto no sucede actualmente en los puentes peatonales de Transmilenio, donde se perciben vibraciones de cierta importancia por el paso de los peatones sobre el puente o por el efecto que generan los vehículos que circulan por las avenidas. Sin embargo, este hecho ha facilitado la identificación de los parámetros modales del sistema estructural que se describe en el presente artículo.

El estudio de los efectos a causa de las vibraciones inducidas se puede hacer mediante procedimientos numéricos detallados, en los cuales se busca simular la respuesta dinámica estructural ante cargas tanto horizontales como verticales, ya sean de carácter dinámico, oscilatorio o estático. Una alternativa ideal para calibrar los modelos numéricos consiste en registrar la respuesta dinámica de la estructura ante señales de baja amplitud, como las correspondientes a las vibraciones descritas. Este tipo de calibración es deseable para el

estudio de funcionalidad, vulnerabilidad y salud de una estructura.

## METODOLOGÍA

Los puentes peatonales seleccionados corresponden a los tramos centrales del puente ubicado sobre la autopista Norte con calle 97 (figura 1) y del puente sobre la NQS con calle 24 (figura 2). La elección de estos dos puentes se hizo en consenso con el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), el primero seleccionado por las constantes quejas de los usuarios a causa de sus excesivas vibraciones y de que no tiene instrumentación instalada por el Centro Internacional de Física (CIF); el segundo se escogió para comparar las mediciones de los registros de los aparatos del CIF con los del estudio realizado por la Pontificia Universidad Javeriana. El primer puente tiene una longitud de 81,26 m, está conformado por tres luces con tres apoyos sencillos, un apoyo doble y una altura promedio de 5,3 m; el segundo tiene una longitud de 100,67 m, está conformado por cuatro luces, cuatro apoyos dobles, un apoyo sencillo y una altura promedio de 5,5 m.

Así mismo, de manera complementaria se llevó a cabo una modelación por el método de los elementos finitos de los dos puentes instrumentados, con el fin de establecer analíticamente las frecuencias y los modos de vibración. De este modo fue posible comparar los resultados obtenidos a partir de los registros en campo con los resultados arrojados por los modelos en elementos finitos.

## Mediciones

Para el registro de las vibraciones se utilizó un sistema conformado por cuatro sensores de alta resolución, cada

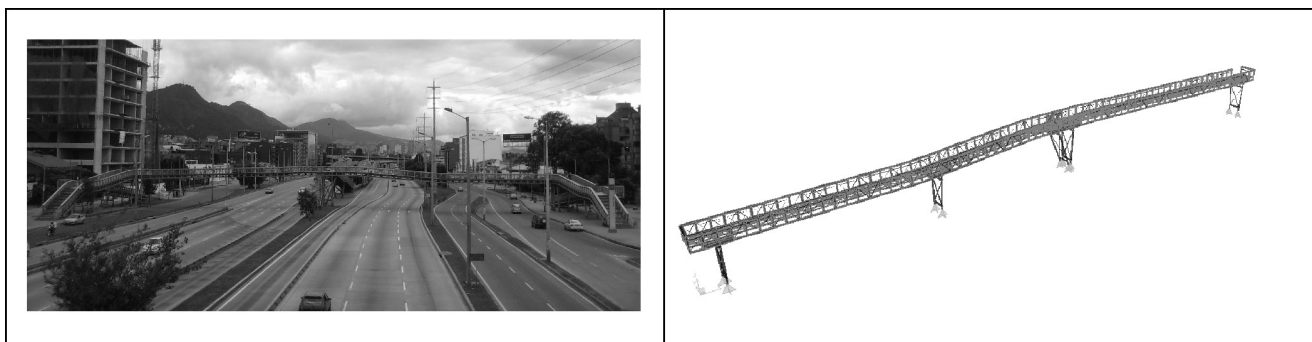


Figura 1 Puente peatonal sobre la autopista Norte con calle 97.

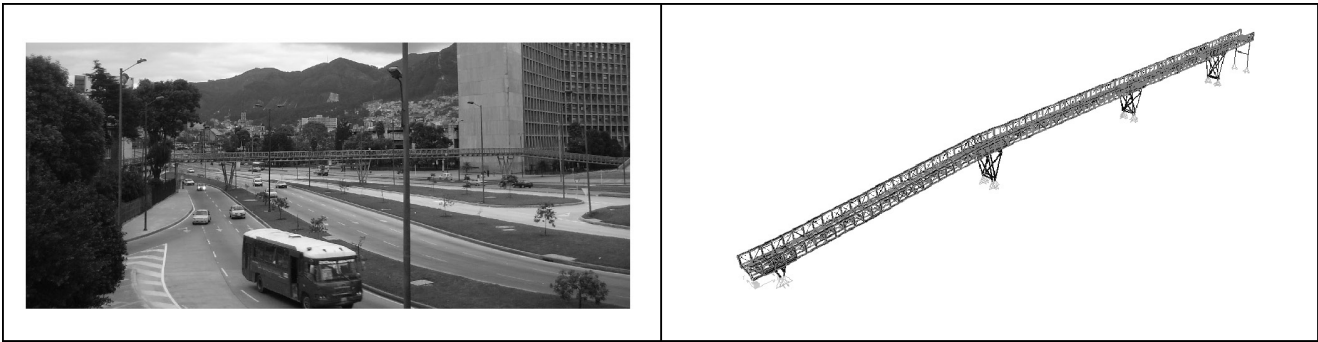


Figura 2 Puente peatonal sobre la NQS con calle 24.

uno de los cuales permite medir la aceleración en una sola dirección, un sistema de adquisición de datos, una planta generadora de energía y un computador portátil con el cual se recopilaban y se analizaron todas las mediciones hechas. Los cuatro sensores de aceleración en dirección uniaxial miden aceleraciones en un rango entre 0,00001 y 0,5 g. La respuesta de cada sensor se mantiene lineal para un rango de frecuencias entre 0,05 y 200 Hz. Cada uno de estos se acopló a una base imantada que facilitó su ubicación sobre el cordón superior de los puentes (figura 3). Así mismo, el sistema cuenta con cuatro equipos que permiten establecer ampliaciones

de 10, 100 o 1000 mV/g, acompañados con filtros para mediciones por encima de los 450 y 100 Hz. Por su parte, el sistema de adquisición de datos es de última tecnología y permite la lectura de hasta 20 canales de aceleración o *strain gages* con una tasa de muestreo por canal de hasta 2,5 kHz. Toda esta información se almacena en un computador portátil, el cual tiene instalada una licencia del programa LabVIEW®. Para el caso del presente trabajo, se configuró la toma de datos de aceleración con una tasa de muestreo de 200 datos por segundo.

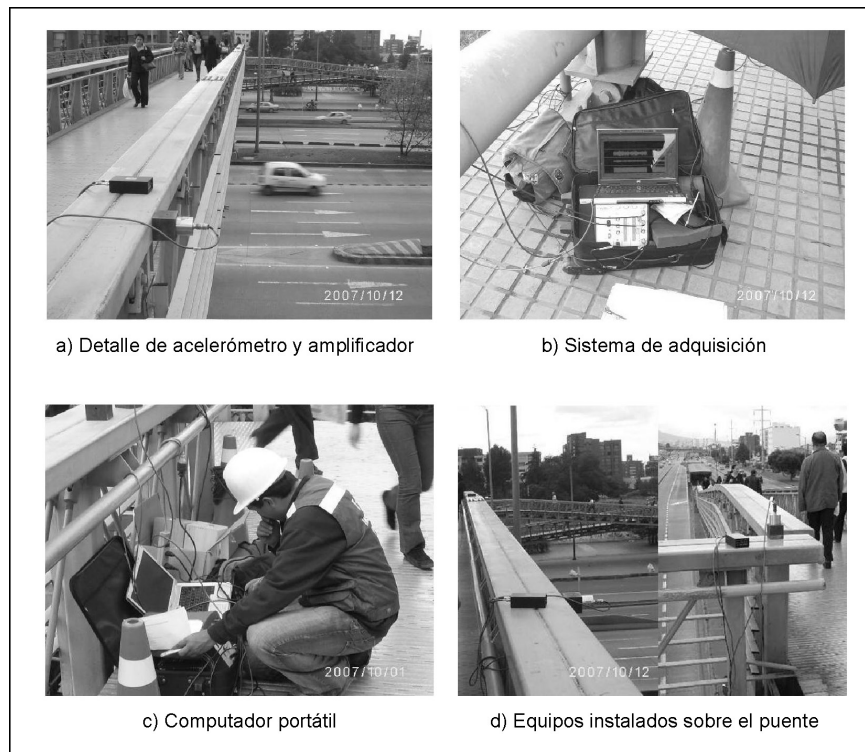


Figura 3 Equipos para medición.

Durante las mediciones se ubicó un acelerómetro en un punto fijo, que sirvió como referencia a los otros tres, los cuales se fueron desplazando en una cuadrícula previamente establecida hasta completar la totalidad de la longitud del puente. Este punto de referencia se ubicó a un metro de una de las pilas (pero no sobre ella). Siguiendo el anterior procedimiento, se tomaron registros en dirección vertical, transversal y longitudinal al puente, con una duración mínima de cinco minutos. Más adelante se muestra una fracción de un registro típico con su respectiva transformada rápida de Fourier (figura 4).

### Metodología NExT-ERA

La metodología usada para la identificación modal de los puentes se divide en dos partes. La primera, conocida como NExT por su nombre en inglés *Natural Excitation Technique*, logra transformar los registros de vibración ambiental a registros de vibración libre. La segunda parte, denominada ERA por su nombre en inglés *Eigensystem Realization Algorithm*, permite identificar mediante estos registros de vibración libre las características modales de la estructura, a través de la identificación de los vectores característicos o *eigenvalues*, así como también de los valores propios o característicos llamados *eigenvalues*. Estos últimos corresponden a las frecuencias naturales de vibración de un sistema dinámico. Dicha metodología hace uso de los diversos registros de vibración tomados en campo, presentados en párrafos anteriores.

En esta técnica, desarrollada por James et al. (1993), se usa la correlación cruzada existente entre una señal de respuesta y una señal de referencia, que en ciertas condiciones satisfacen la parte homogénea de la ecuación diferencial de movimiento. Esta relación existente

entre ambas señales permite analizar las señales como una respuesta de vibración libre de la estructura y, por lo tanto, no se requiere conocimiento de la fuente causante del movimiento. En la referencia Gallego [6] se presentan resultados de aplicaciones de la tecnología a puentes peatonales colombianos. A nivel internacional se presentan ejemplos de aplicaciones de la metodología NExT-ERA en las referencias Brownjohn [1], Caicedo [2], Clayton [4], Qin [8] y Siringoringo [9].

Recordando la ecuación de movimiento para sistemas de múltiples grados de libertad que se presenta en Chopra [3] y en García [5], y suponiendo que la fuerza externa se considerara un proceso aleatorio, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración se estiman igualmente procesos aleatorios, lo que convierte la ecuación diferencial de movimiento en una ecuación diferencial estocástica.

$$\{P(t)\} = [M]\{\ddot{X}\}(t) + [C]\{\dot{X}\}(t) + [K]\{X\}(t) \quad (1)$$

Donde  $\{P(t)\}$  representa un vector de procesos aleatorios,  $\{X\}(t)$ ,  $\{\dot{X}\}(t)$  y  $\{\ddot{X}\}(t)$  vectores de procesos estocásticos  $[M]$ ,  $[C]$  y  $[K]$  representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema dinámico. Al multiplicar la ecuación (1) por un proceso escalar estocástico  $X_{ref}(s)$ , considerado como referencia del proceso aleatorio, se tiene la siguiente ecuación:

$$\{P(t)\} X_{ref}(s) = [M]\{\ddot{X}\}(t) X_{ref}(s) + [C]\{\dot{X}\}(t) X_{ref}(s) + [K]\{X\}(t) X_{ref}(s) \quad (2)$$

e introduciendo el concepto de la función de co-rrrelación entre dos señales cualesquiera  $X(t)$  y  $Y(t)$ , expresada matemáticamente como:

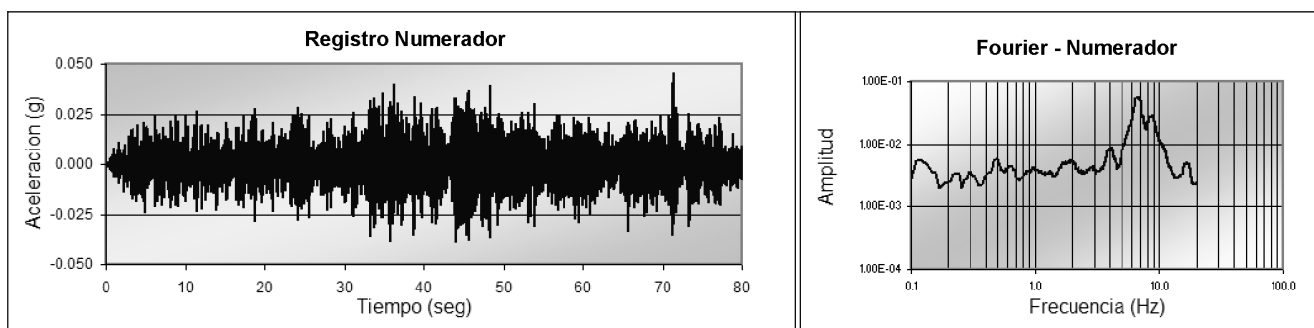


Figura 4 Ejemplo de una fracción de un registro típico.

$$R_{XY}(t, t + \tau) = X(t)Y(t + \tau) \quad (3)$$

y suponiendo que el proceso aleatorio no es estacionario, la función de correlación dependerá únicamente del parámetro  $\tau$ :

$$R_{XY}(t, t + \tau) = R_{XY}(\tau) \quad (4)$$

Introduciendo la ecuación (4) en la ecuación (2), se obtiene la siguiente ecuación de movimiento:

$$R_{pX_{ref}}(t, s) = [M]R_{\ddot{X}\ddot{X}_{ref}}(t, s) + [C]R_{\dot{X}\dot{X}_{ref}}(t, s) + [K]R_{XX_{ref}}(t, s) \quad (5)$$

donde  $R_{pX_{ref}}(t, s)$ ,  $R_{\ddot{X}\ddot{X}_{ref}}(t, s)$ ,  $R_{\dot{X}\dot{X}_{ref}}(t, s)$  y  $R_{XX_{ref}}(t, s)$  representan la correlación cruzada entre la fuerza externa, la aceleración, la velocidad y el desplazamiento, respectivamente, con el desplazamiento de referencia. Como  $s = t + \tau$ , y suponiendo que dentro del proceso estocástico los desplazamientos no están correlacionados para ningún  $\tau$ , la ecuación de movimiento se simplifica:

$$0 = [M]R_{\ddot{X}\ddot{X}_{ref}}(\tau) + [C]R_{\dot{X}\dot{X}_{ref}}(\tau) + [K]R_{XX_{ref}}(\tau) \quad (6)$$

En la ecuación se aprecia que la correlación cruzada entre los desplazamientos y un desplazamiento de referencia satisface la parte homogénea de la ecuación de movimiento. Si a esta ecuación se le aplica la cuarta derivada con respecto al tiempo, se obtiene:

$$0 = [M]\ddot{\ddot{X}\ddot{X}_{ref}}(\tau) + [C]\dot{\ddot{X}\ddot{X}_{ref}}(\tau) + [K]R_{\ddot{X}\ddot{X}_{ref}}(\tau) \quad (7)$$

Esta última ecuación demuestra que la correlación cruzada entre un registro de aceleración y un registro de referencia satisface la parte homogénea de la ecuación de movimiento. Para determinar la respuesta de vibración libre de la estructura, se deben establecer las funciones de correlación de las densidades espectrales, y a éstas se les debe aplicar la transformada inversa de Fourier. Mediante este proceso se obtiene la respuesta de vibración libre para cada punto de medición. En la figura 5 se aprecia, en la parte superior, la correlación espectral de dos puntos ubicados en los cordones superiores de los puentes analizados, y posteriormente el registro de vibración libre obtenido al aplicar la transformada inversa de Fourier al espectro de correlación.

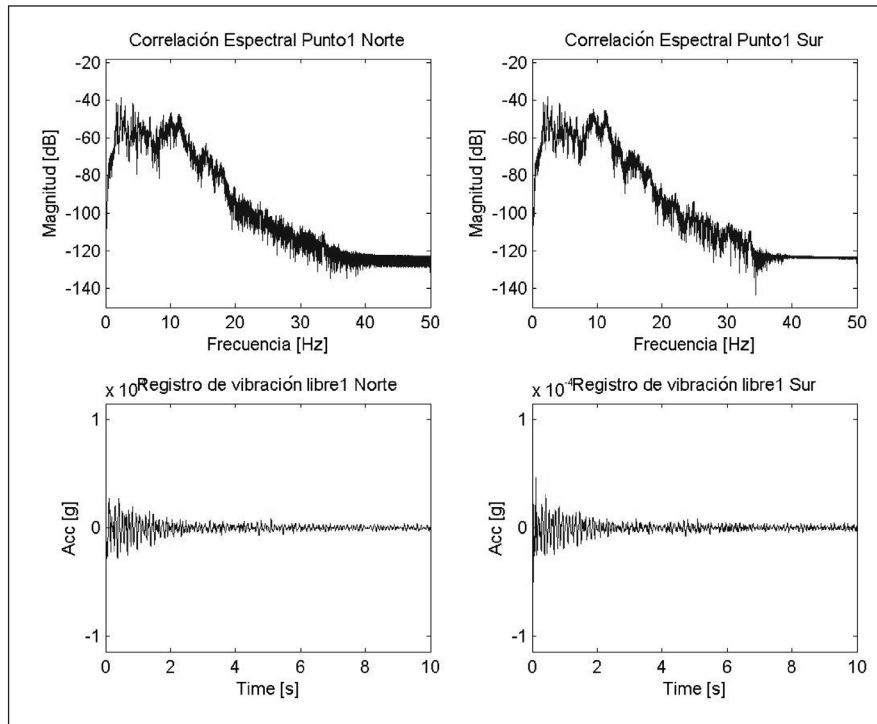


Figura 5 Espectro de correlación y registro de vibración libre.

Con el anterior procesamiento numérico de las señales registradas en campo (respuesta de vibración libre), se procede a realizar el análisis ERA. Con estos parámetros de vibración libre se cuenta con los parámetros de Markov para cada uno de los puntos de medición, los cuales representan la respuesta discreta en el tiempo de un sistema dinámico.

El procedimiento que hay que seguir consiste en obtener las matrices características  $[A \ B \ C]$  de las ecuaciones de la representación discreta en el estado de los espacios de un sistema dinámico:

$$\mathcal{Z}_{k+1} = A\mathcal{Z}_k + Bf_k \quad (8)$$

$$y_k = C\mathcal{Z}_k + Df_k \quad (9)$$

El primer paso de este algoritmo consiste en la creación de la matriz Hankel, que es la representación de la respuesta del sistema dinámico:

$$H_k = \begin{bmatrix} y_k & y_{k+1} & \cdots & y_{k+c-1} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \cdots & y_{k+c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{k+r-1} & y_{k+r} & \cdots & y_{k+r+c-2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde cada valor de  $y_k$  corresponde a un vector conformado por la respuesta del sistema en el tiempo  $k$ , para todos los grados de libertad con que se describe el sistema, los cuales corresponden al total de puntos donde se efectuaron mediciones. Las dimensiones de la matriz  $c$  y  $r$  dependen del número de modos que se desea identificar, de los grados de libertad con los cuales se está haciendo el análisis, el número de parámetros de Markov con los que se cuenta y con la precisión que se desea realizar la identificación modal.

En el caso de la dimensión  $r$ , este valor depende directamente de la cantidad de grados de libertad  $N_n$  de los modos por identificar  $m$  y de la precisión que se le desee dar al método. Se recomienda que esta precisión sea de diez a veinte veces el número de modos que hay que identificar, por lo que la dimensión se obtiene con la siguiente ecuación.

$$r = N_n \cdot 2 \cdot m \cdot 10 \quad (11)$$

La dimensión,  $c$ , depende del número de parámetros de Markov, y de  $r$ , debido al carácter simétrico de la matriz, de la siguiente manera:

$$c = \left( \frac{2}{3} N_m \right) - r \quad (12)$$

Una vez obtenida la matriz Hankel, se continúa con la obtención de sus valores propios, los cuales sirven para la obtención de las matrices antes nombradas:

$$H_0 = R\Sigma S^T \quad (13)$$

$$A = \Sigma_g^{-1/2} R_g^T H_1 S_g \Sigma_g^{-1/2} \quad (14)$$

$$B = \Sigma_g^{-1/2} S_g^T \quad (15)$$

$$C = R_g \Sigma_g^{-1/2} \quad (16)$$

De las cuales se pueden obtener frecuencias de vibración, índices de amortiguamiento y modos de vibración, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$f_{N_i} = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (17)$$

$$\zeta_i = \frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (18)$$

$$\Phi_i = C\Psi_i \quad (19)$$

Donde:

$$A = \Psi\Lambda\Psi^{-1} \quad (20)$$

$$\Lambda = \text{diagonal} [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i] \quad (21)$$

$$\lambda_i = a_i \pm b_i j \quad (22)$$

Todo el anterior planteamiento se hizo en el programa Matlab®, el cual se alimentó de las mediciones tomadas en campo mediante Labview®.

## RESULTADOS

En las tablas 1 y 2 se presentan las frecuencias obtenidas tanto del modelo por elementos finitos como del procesamiento de los registros de campo mediante

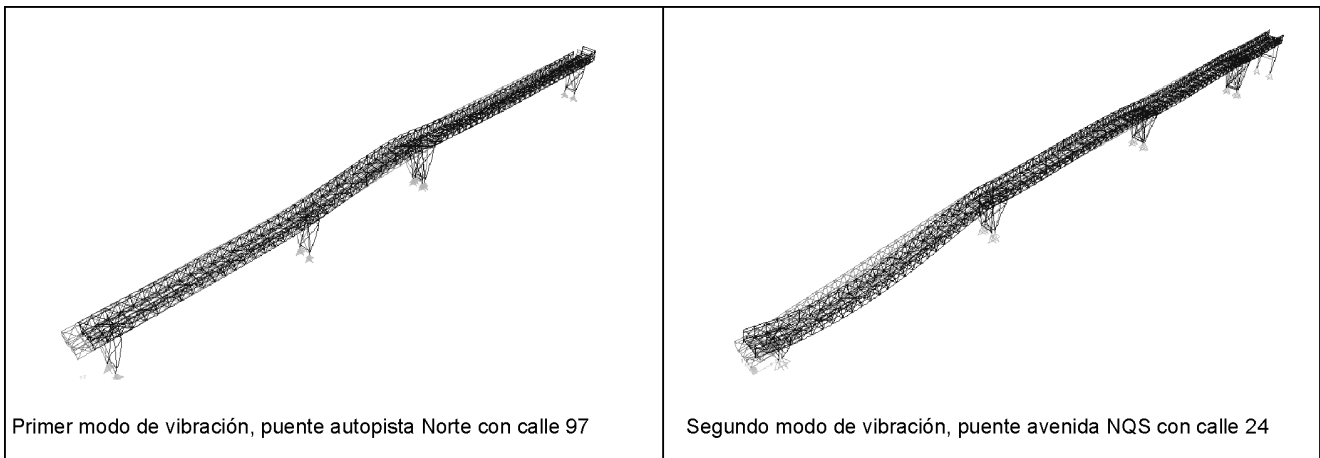


Figura 6 Formas modales de los puentes de estudio.

la metodología NExT-ERA. Igualmente, se indica en las mismas tablas la diferencia en porcentaje entre los dos métodos numéricos. En la figura 6 se ilustran las formas modales de los primeros modos de vibración de los puentes peatonales en estudio.

Tabla 1

Comparación de frecuencias obtenidas del modelo por elementos finitos y las obtenidas por NExT/ERA en el puente de la autopista Norte con calle 97

Modo	Frecuencia (Hz)		Diferencia
	Modelo por elementos finitos (SAP 2000)	NExT/ERA	
1	2,1328	2,1682	1,7%
2	2,9786	2,4892	16,4%
3	4,1354	4,3661	5,6%
4	4,7647	--	--
5	5,4373	5,3111	2,3%
6	5,9725	5,9370	0,6%
7	6,9725	6,2566	10,3%
8	8,5617	--	--
9	8,8925	--	--
10	9,2798	9,4062	1,4%
11	10,493	10,0343	4,4%
12	12,156	--	--

Obsérvese que hay una gran coincidencia de resultados, a pesar de que existen algunos modos de vibración que no se detectaron por la metodología NExT-ERA. A la luz de los resultados, la diferencia promedio entre las frecuencias estimadas con el modelo por elementos

finitos y la metodología NExT-ERA es del 5,5% para el puente de la autopista Norte y de 1,7% para el puente sobre la avenida NQS.

Tabla 2

Comparación de frecuencias obtenidas del modelo por elementos finitos y las obtenidas por NExT/ERA en el puente de la avenida NQS con calle 24

Modo	Frecuencia (Hz)		Diferencia
	Modelo por elementos finitos (SAP 2000)	NExT/ERA	
1	4,4059	4,3590	1,1%
2	4,6695	4,6738	0,1%
3	4,7688	--	--
4	5,0824	4,9897	1,8%
5	5,4317	5,3009	2,4%
6	6,4148	6,5612	2,3%
7	7,6961	--	--
8	7,7894	--	--
9	8,3937	8,1352	3,1%
10	9,2821	9,3963	1,2%
11	9,5797	9,7105	1,4%
12	10,492	10,6547	1,6%

### CONCLUSIONES

Por medio de la implementación de la metodología NExT/ERA se pudieron establecer las frecuencias y los modos de vibración de dos puentes peatonales pertenecientes al Sistema de Transporte Masivo Transmilenio. Las frecuencias obtenidas con los modelos de elementos finitos se ajustan con los resultados obtenidos a partir



de las mediciones de campo (NExT/ERA). Los errores están entre el 0,1 y el 17%, con un error promedio del 5,3% en el caso del puente sobre la autopista Norte y del 1,7% para el caso del puente sobre la avenida NQS. Este trabajo es el primer paso, y guía de futuras investigaciones y proyectos desarrollados en la Pontificia Universidad Javeriana, alrededor de la identificación modal de sistemas estructurales por medio de la toma de registros de vibraciones ambientales. Actualmente se está realizando identificación modal de edificios de varios pisos en concreto reforzado.

## REFERENCIAS

- [1] Brownjohn, J.M.W. (2002, October 29). Ambient Vibration Studies for System Identification of Tall Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 32, issue 1.
- [2] Caicedo, Juan Martín, Dyke, Shirley & Johnson, Erik A. (2004, January 1). Natural Excitation Technique and Eigensystem Realization Algorithm for Phase 1 of the IASC. ASCE Benchmark Problem: Simulated Data. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, vol. 130, issue. 1.
- [3] Chopra, Anil (2001). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2<sup>nd</sup> ed. University of California at Berkeley, Prentice Hall, 844 pp.
- [4] Clayton, E.H. (2002). Modal Identification of a full-scale bridge using the NExT/ERA Method. Presented in National Science Foundation Research Experience for Undergraduates in Japan [PDF]. Available at <http://mase.wustl.edu/wusceel/reujat/2002/clayton.pdf>.
- [5] García, Luis Enrique (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- [6] Gallego, Mauricio (2007, abril). Protocolo de ensayos de caracterización dinámica en puentes peatonales (Portal de Suba). Versión 3.0. En *Estudios y diseños, a precio global fijo sin reajuste, de la troncal calle 26 (avenida 3.<sup>a</sup> – aeropuerto El Dorado – avenida José Celestino Mutis)*, en Bogotá, D.C. Contrato IDU-135-2005. Bogotá.
- [7] The Natural Excitation Technique for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines. James, George, Carne Thomas & Lauffer, James (1993). United States Department of Energy. Available at <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/1992/921666.pdf>.
- [8] Qin, Q. & Qian, L. (2001, October). Modal Identification of Tsing Ma Bridge by Using Improved Eigensystem Realization Algorithm. *Journal of Sound Vibration*, vol. 247, issue 2.
- [9] Siringoringo, Dionysius & Fujino, Yozo (2008, February). System identification of suspension bridge from ambient vibration response. *Engineering Structures*, vol. 30, issue 2.

# Desarrollo de proyectos de infraestructura de transporte en el marco de los TLC

**CÉSAR AUGUSTO PEÑALOZA PABÓN**

Subdirector de Transporte del Departamento Nacional de Planeación

Conferencia realizada en la Escuela Colombiana de Ingeniería el jueves 3 de mayo de 2012 y organizada por el Centro de Estudios de Vías y Transporte.

Me han solicitado hablar sobre el Plan Nacional de Desarrollo, en relación con el sector del transporte y con la manera en que vamos a afrontar este tema del TLC que está tan de moda. En ese contexto, abordaré tres aspectos: primero, cómo está concebido el sector del transporte dentro del Plan Nacional de Desarrollo; segundo, cómo vamos a afrontar el TLC; y tercero, el más importante, cuál es la política nacional logística. Cada vez se hace más necesario contar con servicios eficientes, justo a tiempo, una oferta ajustada a la dinámica productiva del país.

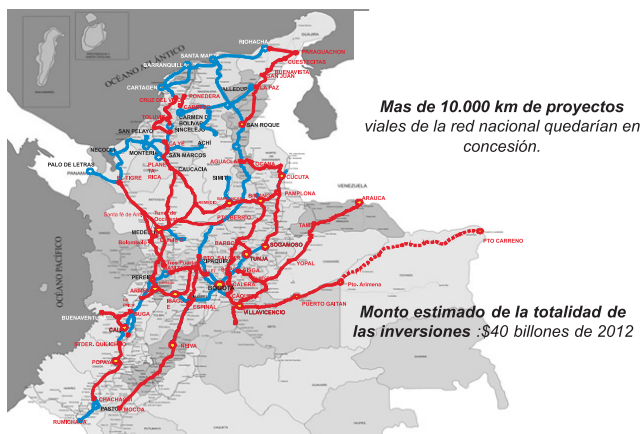
## EL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO

El lema del Plan Nacional de Desarrollo es “Prosperidad para todos”. Su objetivo principal son la convergencia y el desarrollo regional, unir el país, consolidar las regiones, insertarlas en un modelo productivo, económico y social del país mucho más integrado. Esto se hace con base en tres pilares: el crecimiento, la competitividad y la innovación. Ahí está el sector del transporte. Como

ejes transversales de estos pilares se encuentran el buen gobierno, la transparencia, la entrega de cuentas, el diálogo con el ciudadano y todas las negociaciones del TLC y su impacto en la economía nacional. También se incluye la sostenibilidad ambiental, en la que hay que procurar no caer en el proteccionismo que inhiba el desarrollo ni tampoco emprenderlo de modo tan agresivo que dañe el medio ambiente.

En el pilar de innovación se identificaron cinco locomotoras para lograr la prosperidad: el sector agropecuario, el minero-energético, el de vivienda, los nuevos sectores y, obviamente, el transporte. Como eje transversal también se ha dicho que más que a locomotoras, el sector del transporte corresponde a los rieles por donde van a ir ellas. Por eso, además de identificarlo como una de las cinco locomotoras de la prosperidad, propongo un apoyo de logística y servicios del sector.

Ahora, ¿cómo está inmerso el sector del transporte en el PND y cómo lo apoya, teniendo en cuenta que éste se fundamenta en menos pobreza, más empleo y mayor seguridad? Es fundamental incluir en este análisis



Estructuración integral de nuevos corredores de concesión vial.

el cambio climático. Como ingenieros, tenemos unos retos importantes en ese aspecto: la adaptabilidad en la infraestructura, tanto en diseños como en materiales; la movilidad; el desarrollo de vías terciarias en regiones apartadas; la necesidad de reducir costos o tiempo, o los dos, porque básicamente el tiempo se expresa en dinero y la reducción de costos es el pilar de un sistema de transporte eficiente.

En materia de generación de empleo, hay inversiones que pueden llegar a los 35 billones de pesos desde el sector público. Esa cantidad genera más o menos 500 mil empleos. A primera vista, uno piensa que es muy alto el costo en comparación con los puestos de trabajo que genera, pero hay que tener en cuenta que el desarrollo de la infraestructura no es intensivo en uso de mano de obra sino en capital y, obviamente, en insumos. Lo que pasa en ese esfuerzo de inversión es que, como sector transversal, genera mayores empleos en las áreas de manufactura agropecuaria, al facilitar el esfuerzo comercial y generar negocios, todo enfocado al comercio exterior.

En temas de seguridad, se están haciendo inversiones para combatir el terrorismo y el narcotráfico. La ola invernal también impone el reto de garantizar el tránsito y la transversalidad en los otros sectores. No sólo es importante participar en el Plan Nacional de Desarrollo sino en el producto interno bruto (PIB). El sector se ve reflejado en las cuentas nacionales en dos aspectos: en servicios de transporte de carga y aéreo, y en la inversión en obras civiles, que es el desarrollo en infraestructura. Al sumarlos se alcanza alrededor de un 7% del PIB, lo cual es significativo con un PIB de 600 mil millones de pesos.

Esa participación nos hace relevantes en el Plan Nacional de Desarrollo. Esto nos llevó a plantearnos dentro del gobierno objetivos y estrategias específicos. Uno de ellos tiene que ver con proveer infraestructura y servicios que mejoren las condiciones de accesibilidad e intermodalidad en pro de la competitividad del país. Es un propósito bastante ambicioso, por lo que las estrategias deben ser mucho más concretas. Hay que incrementar el inventario y la capacidad de la infraestructura en transporte, aumentar las dobles calzadas en los principales corredores de comercio exterior, tener la infraestructura acorde con ese incremento económico que el país ha experimentado durante los últimos años, promover el uso de transporte alternativo. Algunos se preguntarán por qué el río no funciona, el tren no funciona... muchas veces se debe a aspectos económicos difíciles de manejar. Eso también tiene que ver con la educación de la casa. El tema férreo, por ejemplo, sólo se especializa en el transporte de carbón; a corto plazo vamos a generar un salto significativo en términos de *stock*, nuevamente con unas inversiones fuertes. Hace poco se aprobó la ley de asociaciones público-privadas, que busca vincular con mayor fuerza al sector privado en el desarrollo de proyectos de infraestructura a través de concesiones y asociaciones públicas.

Igualmente relevante es el tema de los servicios. Consiste en garantizar el uso de la infraestructura en condiciones de eficacia, eficiencia y seguridad. De nada sirve tener todas las dobles calzadas en servicio si no se cuenta con un transporte eficiente que permita reducir costos y tiempo. Lógicamente, la primera estrategia consiste en aumentar el empleo de la infraestructura, desarrollar un sistema logístico orientado a la ciencia. En una operación de comercio exterior hay muchos sectores involucrados: la Policía Fiscal Aduanera, la Dian, el Ministerio de Transporte... como 17 entidades que deben estar coordinadas para facilitar el comercio exterior. Es un sistema logístico centrado en la eficiencia para que haya prosperidad económica en el país.

Otro punto tiene que ver con mejorar la seguridad del transporte para reducir la accidentalidad en el transporte. Eso también es estratégico. Con respecto a los efectos transversales, el plan se propone lograr el fortalecimiento institucional y la consolidación del sistema de información y servicio al ciudadano, así como también fortalecer el marco regulatorio en los aspectos técnico, operativo de entrega de contratos, de

licitaciones, un tema regulatorio bastante importante y normativo. Estos objetivos, sobre todo la concreción de las estrategias, se consiguen con una fuerte inversión.

La banca multilateral, especialmente el Banco Mundial, con base en su experiencia recomienda a países en vías de desarrollo, como Colombia, incrementar el gasto en infraestructura y mantenerlo entre un 3 y 6%. El 3% para ellos es una cifra moderada, pero representa un esfuerzo fiscal bastante grande. Si se llega a un 6%, se alcanza un nivel como el de Corea del Sur, donde tienen sistemas inteligentes de transporte que le dicen a uno por dónde ir, cómo, a qué hora; si la temperatura baja a cierto grado, hay un sistema térmico que calienta la carretera para que no haya accidentalidad. Aunque vamos por buen camino, aún nos falta para llegar a ese anhelado 3% que recomiendan. En países como Chile, Brasil y México ya lo hicieron en la década de los noventa. Es un salto muy grande que tenemos que dar.

La ley de asociaciones público-privadas va a permitir hacer inversiones hoy para pagarlas diferidas. Así vamos a aumentar el *stock* de infraestructura. Ya se aprobó la ley del nuevo sistema general de regalías, que se espera que también aporte algo en esas inversiones en el sector del transporte. Son como tres billones al año, de los cuales un 40% podría utilizarse en inversiones de infraestructura. Por último, tenemos las inversiones del Fondo de Adaptación (cerca de \$1,9 billones), creado a raíz de la ola invernal, que está invirtiendo en puntos críticos y aquellos que requieren garantizar la transitabilidad.



Para mejorar las condiciones de accesibilidad e intermodalidad, se planea consolidar los corredores de comercio exterior en doble calzada, garantizar el mantenimiento integral de infraestructura e implementar el programa "Caminos para la prosperidad".

El reto es mantener la inversión durante una década, ocho años, dos periodos presidenciales, pero que de verdad sea el salto de infraestructura para el país; de lo contrario, seguiremos teniendo ese rezago. Dentro de ese PND hay unas buenas ideas que están asociadas a cada modo de transporte o subtema dentro del sector:

Lo primero es consolidar los principales corredores de comercio exterior en doble calzada, Bogotá-Buenaventura, el túnel de La Línea, Buga-Buenaventura, que están en pleno desarrollo. Otro corredor clave es Bogotá-Santa Marta, que el año pasado se entregó en concesión en el proyecto Ruta del Sol, con una inversión cercana a los seis billones de pesos.

Después están las actividades de mantenimiento, que son tan importantes como la ampliación de capacidad de la infraestructura. Para eso contamos con un programa de mantenimiento integral y apoyo en temas regionales. Queremos impulsar proyectos férreos, que promuevan desarrollos productivos. El ministro de Transporte dice que Colombia se demoró más construyendo los trenes que abandonándolos, una paradoja triste pero real. Cabe señalar que en todo el mundo los trenes se manejan para *commodities*, normalmente carbón.

En cuanto a los corredores fluviales, están las secciones enfocadas en los ríos Meta y Magdalena. El tema de la navegación fluvial es una paradoja económica. En una empresa de Medellín nos comentaban que utilizan el transporte fluvial para llevar sus productos desde Medellín hasta Puerto Berrío. Allí los embarcan en barcazas, los llevan a la costa atlántica, pero por temas de confiabilidad, de costos, de tiempo, muchas veces no es eficiente. Decían que se ahorraban un 8% en costos de transporte pero que les tocaba tener mayores inventarios, por lo que al final el balance es neutro. Sin embargo, ahí hay una gestión fundamental, sobre todo en el río Magdalena.

El tema de puertos es igualmente importante para el TLC. La mayor parte de la capacidad portuaria que se ofrece en el país es privada, motivo por el cual se pretende fomentar el uso público. Estamos próximos a expedir una política integral portuaria que tiene aspectos ambientales y económicos. El canal de Panamá está en ampliación, lo que significa que cada vez van a pasar por ahí buques más grandes, aspecto que va a cambiar los patrones logísticos mundiales. Se requieren instalaciones, facilidades portuarias... Hay un tema de

medición de eficiencia portuaria por indicadores operativos, por ejemplo la facilitación de trámites para el comercio exterior. A eso me refería cuando hablaba de las 17 entidades que deben estar alineadas.

En relación con los aeropuertos, tenemos una infraestructura que cumple una labor social. Hay sitios en el país a los que sólo se puede llegar por vía aérea. Hay 41 aeropuertos para intervenir, entre los cuales el más importante es el de Eldorado. Se acaba de concretar la ampliación de la terminal nacional, que vale 60 millones de dólares, más 600 que ya se habían invertido. Además, las condiciones meteorológicas nos están obligando a trasladar la tecnología satelital para la aeronavegación; hoy se hace con radares tierra-aire y la idea es evolucionar a la tecnología satelital.

Es necesario considerar lo referente al paso de fronteras, en particular ahora que las relaciones con Ecuador y Venezuela están muy fuertes. Estamos ampliando los pasos de fronteras, especialmente en Nariño, San Miguel y uno nuevo con Venezuela.

Por otra parte, se está trabajando en el desmonte de la tabla de fletes. Existe un asunto social importante por la propiedad del parque automotor. Son muchos propietarios. Cada vez que se toma una decisión en ese aspecto hay una amenaza de paro que no sólo significa una presión para el gobierno y para el Ministerio de Transporte, sino una vulnerabilidad para el intercambio comercial y la economía. Entonces es fundamental tener clara la política: cómo va a evolucionar el transporte de carga, cómo se va a formalizar y a profesionalizar, cómo se van a reponer los vehículos... porque cuando cumplen cierto tiempo de servicio, se vuelven obsoletos, consumen más combustible, contaminan.



Los corredores férreos deben encaminarse a impulsar proyectos de desarrollos productivos.

Hay un tema de fondo en el que estamos trabajando, que es el ambiental, y también está en marcha un ambicioso plan de seguridad vial con el que se busca reducir en un 50% la accidentalidad vial en los próximos 4 años.

## **BUEN GOBIERNO: CERO TOLERANCIA CON LA CORRUPCIÓN**

En materia de buen gobierno, hay un compromiso de cero tolerancia con la corrupción. El Instituto Nacional de Vías ha entregado cerca de 21 contratos por 3,6 billones de pesos. A la fecha, estas adjudicaciones están totalmente finalizadas. Es todo un reto no generar ningún ruido frente a esas adjudicaciones.

Así mismo, se están haciendo valiosos esfuerzos de reinversión, con estudios apropiados para entregar contratos como es debido y llevar a cabo buenas obras. Hay un tema de gestión contractual que tiene que ver con el diseño de políticas, unas al servicio del transporte y la logística, y otras al fortalecimiento jurídico en la gestión de la defensa del Estado. Ojalá con las generaciones futuras de ingenieros esto cambie en forma radical. Ustedes tienen esa responsabilidad. Es que, lastimosamente, algunos contratistas se han dedicado a ganarse contratos para demandar al Estado y por eso no se entregan las obras. Es paradójico que con los recursos, con la voluntad, con todo para desarrollar los proyectos, los trabajos de ingeniería se conviertan en negocios jurídicos. Lo más importante es la transformación del Instituto Nacional de Concesiones en la Agencia Nacional de Infraestructura, con el compromiso de hacer mayores y mejores estudios y diseños para entregar los proyectos en concesión.

A todos los indicadores se les hace seguimiento mes a mes, además de que están en el Plan Nacional de Desarrollo. El primero: la construcción de kilómetros de doble calzada. Tenemos cerca de 700 en operación actualmente y la meta es llegar al 2014 con 2000. En el río Magdalena queremos lograr una profundización de 800 kilómetros de vía navegable; esperamos duplicar la vía férrea en operación y, sobre todo, atraer la inversión privada. Debemos captar 18 billones de pesos en inversión privada. Es un reto bastante importante en tan corto plazo.

## QUÉ SIGNIFICA SUSCRIBIR UN TLC

Cuando en Perú entró en vigencia el tratado con los Estados Unidos, el incremento de las exportaciones fue del 35%; en Centroamérica, del 47%; en Costa Rica, del 41%. El año pasado, Colombia creció el 5,9% a pesar de la coyuntura económica global y el descenso en la demanda de los Estados Unidos y Europa. Se espera que, aparte de ese 5,9%, haya entre medio y un punto más de crecimiento. En términos de exportaciones, se espera que el incremento esté entre el 8 y 12%. En términos de volumen, que es realmente lo que afecta y presiona la infraestructura, se prevé que crezca entre el 25 y 30%. Hoy por hoy en los puertos se mueven 150 millones de toneladas; si llegamos a ese 30%, son 50 millones de toneladas más. Se van a necesitar puertos, camiones, barcos... Es un reto enorme.

El panorama actual de los kilómetros de doble calzada muestra que tenemos más de 1000 construidos, pero en operación apenas hay 700 u 800. La idea, como se dijo antes, es llegar al 2014 con cerca de 2000 y al 2018 con aproximadamente 4000 kilómetros. ¿Qué vamos a tener en doble calzada? Bogotá-Buenaventura, Bogotá-costa atlántica, Bogotá-Cúcuta y Cali-Rumichaca; más una inversión fuerte en Antioquia, en las autopistas de la Prosperidad (Montaña), y algo entre los principales puertos. Se espera invertir unos 40 billones de pesos en tales vías. Esto está en estructuración y vale 110 mil millones de pesos, una cifra nada despreciable para hacer estudios.

Contamos con dos programas con énfasis regional. No se trata de consolidar únicamente la infraestructura de comercio exterior sino las regiones que la integran. Hay un plan de apoyo a los departamentos y cambios para la prosperidad, respaldo a los municipios. Es como una recta final: hay venas, arterias, no hay unas más importantes que otras. Se debe generar popularidad en términos de conectividad, en la posibilidad de ir de un punto a otro.

Aquí hay un tema importante y es el desarrollo de la altillanura. La región andina, que es donde se ha centrado el desarrollo del país, tiene cerca de 22 millones de hectáreas. Esta región aún no se ha explotado ni desarrollado como se debe, pero si lográramos desarrollarla, habría entradas importantes en hidrocarburos. Hay unos temas de agroindustria muy importantes. Se espera que la economía crezca mucho más, pero como es una región poco habitada, es también poco



Una de las estrategias es llevar a cabo el plan maestro de desarrollo de la navegación fluvial y su accesibilidad terrestre para combinaciones intermodales. En tal sentido, el río Magdalena es una prioridad.

conectada. Se deben desarrollar vías, mirar qué se hace con el río Meta, fundar ciudades para que la gente se traslade a ellas y fortalecer la mano de obra que pueda cultivar la tierra y explotar las minas. Es una apuesta por el país que tiene el Plan Nacional de Desarrollo, que no va a dar resultado en los próximos dos años pero sí en diez.

En los ámbitos portuario y férreo se espera que Colombia produzca 124 millones de toneladas de carbón en el 2014 y que en el 2020 se llegue a 150 millones de toneladas explotadas; el 95% de ese carbón se va al mercado internacional, cuyo destino principal son los Estados Unidos. Ahora tenemos socios con intereses muy importantes en Brasil. Hay unas zonas poco explotadas en el país que se están analizando para conectar esa infraestructura, que son Norte de Santander, Santander, Boyacá y Cundinamarca.

¿Cómo estamos para movilizar este carbón? Pues en las condiciones actuales tenemos unas ventajas en infraestructura portuaria para el carbón. Hay un término que es la capacidad instalada: cuánto puede mover en una unidad de tiempo, que normalmente es un año. Cuando hay una movilización superior al 75%, el puerto entra en un estado de congestión en el que empieza a generar demoras o sobrecostos. En Colombia algunos están en el 81 o 91%, muy cercanos a la congestión. Entonces tienen que invertir en su expansión.

¿Cómo esperamos estar en el 2020? El escenario no es favorable. Si no atraemos la inversión privada, vamos a estar en unos cuellos de botella. Para optimizar esa infraestructura se plantea complementar la red de la siguiente manera:



Entre las ideas fuerza del sector transporte está la consolidación de nodos de transferencia, gestión aérea y portuaria.

Desarrollo para los carbones de Boyacá y Santander. El tren del Carare requiere una inversión de 1200 millones de dólares. Hay un grupo brasileño interesado en hacer esa inversión para poder explotar la carbonífera. Tenemos el sistema férreo central para llevar el carbón desde el Magdalena Medio hacia los puertos del Atlántico. El desarrollo portuario para carbón está enfocado en Santa Marta. La idea es impulsar una nueva zona en La Guajira, que se denomina Dibulla, y generar conectividad férrea para sacar el carbón.

Se habla de conectar los dos litorales. Unos empresarios chinos nos propusieron hacer un túnel mucho más bajo que el de La Línea y otro férreo de 24 kilómetros de longitud para generar esa conectividad. Se está analizando el tema. La inversión podría ser de billones de pesos. Lo más importante es el desarrollo de la navegabilidad en los ríos Meta y Magdalena para tenerlos como alternativa de transporte nacional. Hay municipios en los que la gente viaja por el río y muchas veces sólo llegan los productos a través de él.

El río no sólo sirve para transporte, también tiene un potencial de generación eléctrica, agroindustrial, maderero... Hay mucho por desarrollar alrededor de la cuenca del río Magdalena. Para esto se anunciaron inversiones importantes. Entre Barrancabermeja y la costa atlántica hay una profundidad de ocho pies que permite una navegabilidad constante; pero entre Barrancabermeja y Puerto Salgar, que es lo que atendería toda esta región del altiplano cundiboyacense, no hay la suficiente profundidad. Se van a invertir cerca de 400 millones de dólares en unas obras de encauzamiento entre

estos dos puntos. Esperamos que puedan incrementar la movilización de productos a través del río, que obviamente es el transporte más barato que existe, el que menos combustible consume, el de más capacidad de arrastre.

Claro, tiene unas limitaciones importantes: uno manda piña a través del río Magdalena, se demora cinco días en llegar a puerto y al final del viaje está dañada. Entonces el transporte se concentra en productos no perecederos. Lo que se busca es una ruta de equilibrio: seguramente por el río se irán los hidrocarburos, por tren el carbón y los demás productos por la Ruta del Sol.

Por último, voy a presentar unas conclusiones antes de la sesión de preguntas. Ojalá lográramos la inversión que hemos planteado. Llegar a ella y mantenerla es la única manera de dar ese salto en infraestructura. Todo el esfuerzo del Plan Nacional de Desarrollo está en el avance en infraestructura. En cuanto al TLC, si no aprovechamos bien la capacidad de los medios de transporte, estaremos en desventaja para competir con los Estados Unidos en el tema de importaciones y exportaciones. Es fundamental generar esa cohesión regional, no sólo enfocarse en esfuerzos para la infraestructura del comercio exterior sino en cómo generar el acceso tanto de bienes como de personas en todo el territorio nacional. Por eso la logística es tan importante, no sólo la infraestructura. Se trata de saber usarla.

Hay un tema fundamental y es el del transporte automotor de carga. Obviamente hay que reconvertirlo en el *Green Business*, que es uno de los principales indicadores internacionales en materia de comercio exterior. Vale más llevar un contenedor de Bogotá a Buenaventura que de Buenaventura a Shanghai. Hay que balancear esos costos.

## PREGUNTAS

### ¿Qué ancho de trocha se ha pensado?

Hay una infraestructura que está en operación. Los costos de llevarla a trocha estándar son cuantiosos: hasta 1,5 veces el valor de la inversión inicial. Eso se está analizando y sí se va a llegar a la trocha estándar. En los nuevos desarrollos vamos a duplicar el número de kilómetros en operación, y los nuevos proyectos que se unan a esos tramos en operación van en trocha estándar. Esto trae beneficios en capacidad de arrastre y econo-

mía. Se está pensando construir un tercer carril, como pasa en Europa, donde hay cinco clases de trochas.

**En Eldorado había un proyecto de tercera pista y un acceso para la carga de exportación de flores por el occidente. ¿Qué pasó con eso?**

En este momento está en desarrollo el plan maestro del aeropuerto y uno de los aspectos que va a tocar es la necesidad de esa tercera pista. Ahí hay varios aspectos que se deben tomar en cuenta. Hoy, el aeropuerto Eldorado mezcla operaciones comerciales con operaciones militares. Entonces hay dos opciones: una podría ser generar un nuevo aeropuerto en algún lugar de la sabana, que se centre en operaciones militares, y dejar Eldorado para operaciones comerciales; o crear una tercera pista. Es lo que se está estudiando.

**En el caso del río Magdalena, el canal del Dique está afectado por la sedimentación. Me imagino que el mantenimiento es prioritario, aunque no lo mencionó...**

Sí, el canal del Dique se usa hoy desde Barrancabermeja hasta Cartagena; por el norte sigue hacia Barranquilla

(Calamar). Ahí hay un interesante asunto de transporte de hidrocarburos que van a Cartagena. Existe un dictamen de la autoridad ambiental en cuanto a que se debe mejorar el tema de sedimentaciones porque la bahía de Cartagena se está afectando fuertemente. Ahora, con la ola invernal, todos vieron cómo se inundó ese sitio. Se rompieron los diques, muchas veces por intervención del hombre: sacan el agua en periodos de sequía, meten las tuberías por los diques y cuando llegan las épocas lluviosas, eso genera fallas estructurales en los elementos. Este tema se está revisando más desde el punto de vista de la vulnerabilidad de la región, sin descuidar lo que concierne al transporte de hidrocarburos. Para eso el Fondo de Adaptación, entidad que se creó para mitigar las consecuencias de la ola invernal, está diseñando un plan integral de manejo de la región. Es la zona en la que se da el balance hídrico del país: en épocas de lluvia acumula agua, en épocas de sequía las libera. Además de que hay asentamientos humanos, el pueblo es el que se está arriesgando.



# Tecnología

## Innovación en la construcción en Colombia, una obligación

**Nury del Rosario Forero Hurtado**

Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Especialista en Gerencia de Obras de la Escuela de Administración de Negocios  
nury.forero@escuelaing.edu.co

En países como Estados Unidos, Canadá, Italia y Francia, los presupuestos destinados a la investigación, ciencia y tecnología en las entidades tanto públicas como privadas se caracterizan porque sirven para desarrollar programas que acompañan la innovación y el cambio en las tendencias y buenas prácticas en la construcción, de tal forma que cada proceso constructivo es certificado y los materiales están avalados por un instituto con muchos años de investigación: igualmente, la cultura de estas naciones está focalizada, es decir, que existen empresas con más de cien años en la investigación de productos que dan cada vez más soluciones en materia de la construcción de obras pequeñas, medianas y grandes; ejemplo de ello es el inmenso avance en la maquinaria que facilita la ejecución de las obras y disminuye el tiempo de realización.

Este aporte de la investigación, aplicado a innovar, ha transformado el modo en que las construcciones y edificaciones nuevas y existentes se proyectan y, por qué no decirlo, ha cambiado la manera como las obras se construyen, se mantienen y se operan en naciones enteras. Dicha estandarización de las buenas prácticas de construcción, al igual que la especialización de los materiales y productos de alta tecnología, la han impulsado las entidades gubernamentales e institucionales de estos países, con grandes satisfacciones y ahorros en sus partidas de inversión, en especial en los costos directos de los proyectos.

Durante el pasado año vimos en Colombia la aparición de diversos proyectos en los sectores privado y público, con fracasos dolorosos para el gremio de la ciencia, de la ingeniería y de la política pública. Tanto el gobierno como el sector privado y la academia tienen la responsabilidad de propugnar el desarrollo en las nuevas técnicas de la construcción, en busca de reducir la brecha que existe en nuestro país respecto de este tema.

Pese a que el entorno ha cambiado y a que lo que se llama ahora alta tecnología ha avanzado, Colombia le tiene miedo al cambio, a dar ese salto cuántico respecto de este tema; todavía se insiste en construcciones convencionales, además de la desnutrición en tecnología en los materiales que se intervienen, y lo que es peor, sin los procedimientos certificados por un ente que aplique todo el rigor en caso de que éstos no se cumplan a cabalidad.

La construcción en Colombia está como hace 80 años. Prueba de ello es el mal estado de las vías (llámense huecos o cráteres, hundimientos, derrumbes, fracturas, inundaciones, etc.) por las que nos movilizamos a diario y ni hablar de las mal denominadas autopistas por las que se transporta la economía del país. Requerimos urgentemente maquinaria, productos innovadores y probados con éxito en otras naciones, y también desarrollados en Colombia; necesitamos traer y aplicar con urgencia la tecnología de estos países, para minimizar esa brecha que nos está empobreciendo y que debemos afrontar. Si por algo nos caracterizamos los colombianos es por el ingenio, que sumado al aprendizaje y la adopción de las buenas y exitosas prácticas en la construcción, en los materiales, en los procedimientos, en ir a la vanguardia, en adoptar estas buenas prácticas, termina por beneficiar al medio ambiente; en este orden de ideas, se podría hablar de la verdadera responsabilidad social no sólo para con el entorno en el cual se desarrollan las obras, sino también para la población que los disfruta, con la optimización del periodo de retorno de las inversiones de los proyectos.

Para los inversionistas, las prácticas convencionales y los periodos normales de retorno no son suficientes, ya que la economía actual castiga la ineficiencia operacional. La falta de tecnología de las edificaciones y de la construcción en general, la generación de costos adicionales por conflictos en la deficiente coordinación interdisciplinaria de documentos constructivos, al igual que el impacto económico a nivel legal y por retrasos como consecuencia directa de éstos, son los principales indicios de que se requiere tecnología de punta para cumplir con la obligación de hacer las cosas bien, es decir, que se cumplan los presupuestos y los cronogramas, lo que puede convertir a los propietarios de los proyectos y a sus inversionistas en convencidos de sus apuestas en Colombia.

Es una necesidad del país fortalecer a los profesionales en este nicho específico de la investigación en construcción, en perder el miedo a innovar apoyados en protocolos internacionales compro-

bados; es una realidad la carencia de infraestructura suficiente, adecuada, de larga vida útil, que satisfaga las necesidades de toda la población. Sin infraestructura en tema vial, autopistas, aeropuertos, puertos, viaductos, túneles y demás sistemas de transporte masivo, Colombia pierde competitividad frente a los países vecinos y al mundo global actual. Se requiere también abordar y fortalecer el tema de la construcción de infraestructura de servicios públicos de pequeña, mediana y gran escala, tales como acueductos y alcantarillados, plantas de tratamiento de agua potable y residual, redes eléctricas y de gas, centrales de generación eléctrica, megaproyectos de ingeniería, etc., todos estos con tecnología de punta, la cual ya existe en el mundo y la debemos aplicar.

Actualmente hay una limitante en cuanto al aprovechamiento de procesos innovadores al servicio de la ingeniería. La tecnología de punta no se usa por desconocimiento, falta de mano de obra certificada, de garantías dadas en el país y de experiencia. Es necesario romper paradigmas en cuanto a la construcción tradicional, aprovechando buenas prácticas de uso de sistemas, equipos y productos de vanguardia que minimizan tiempos de ejecución, riesgos laborales y costos, y mejoran la calidad de vida, aumentan la calidad de las obras, su vida útil y la productividad del entorno urbano, además de que permiten una rápida reacción ante los inconvenientes cotidianos.

La ausencia de ingredientes de investigación, desarrollo creativo e innovación, al igual que el incipiente interés por los procesos ecosostenibles en el país, representa un reto para la ingeniería en Colombia.

Por último, invito a todos los colegas a innovar en técnicas de construcción, a capacitarnos en la tecnología de punta, a invertir en equipos de alta eficiencia, pues la suma de todo esto mejora las condiciones de trabajo de las personas, reduce costos, alarga la vida útil de las construcciones y cuida el medio ambiente.

