

Julio - Septiembre de 2012

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000,00

03



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas - Publindex - Clasificación tipo C
Publicación incluida en Ulrichsweb.com™
Tarifa postal reducida No. 2012-107
4-72 la Red Postal de Colombia
Vence 31 de diciembre de 2012

- Comparación del comportamiento de elementos estructurales a escala de concreto convencional y de concreto con agregados reciclados.
- Algunas prácticas asociadas con el desarrollo sostenible en pavimentos.
- Segregaciones granulométrica y térmica en las mezclas de concreto asfáltico.
- Diseño de un sistema de control y supervisión de estaciones de bombeo.
- Actuadores de efecto Peltier de semiconductores: "La nevera del futuro".
- Evaluación de la rigidez a flexión de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural (II parte).
- **ENTREVISTA**
Angélica Castro Rodríguez

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

Ingeniería

87

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
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

¿Solución facilista o subdesarrollista?

Jairo Alberto Romero Rojas

7-14

Comparación del comportamiento de elementos estructurales a escala de concreto convencional y de concreto con agregados reciclados

Pedro Nel Quiroga Saavedra y Nancy Torres Castellanos

Mientras en algunos países se recicla casi el 100% de los escombros de construcción y demolición (C&D), en Colombia sólo un pequeño porcentaje se recicla. Esto se debe a varias razones, entre las que se puede mencionar que la mayoría de los constructores, dueños y entidades públicas no sabe que se puede hacer concreto de buena calidad con agregados reciclados.

15-25

Algunas prácticas asociadas con el desarrollo sostenible en pavimentos

Sandra Campagnoli Martínez

La creciente demanda de una infraestructura vial con adecuada capacidad y funcionalidad, sumada a la imperiosa necesidad de conservar los recursos naturales, reducir el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), han puesto el concepto de sostenibilidad en el orden del día de la ingeniería de pavimentos.

27-41

Segregaciones granulométrica y térmica en las mezclas de concreto asfáltico

Fernando Sánchez Sabogal

La segregación de las mezclas asfálticas en caliente constituye un problema, cuyo resultado práctico es el comportamiento deficiente de muchos pavimentos; por lo tanto, su eliminación es indispensable si se desean obtener mezclas de pavimentación de alta calidad. En los pavimentos asfálticos se identifican dos tipos de segregación: granulométrica y térmica. Este artículo se refiere a ambos y presenta un esbozo de sus causas y de los métodos conocidos para minimizar su ocurrencia. Incluye, al final, una lista de verificación donde, de manera concisa, se describen el origen de las formas usuales de segregación y las comprobaciones y ajustes posibles para corregirlas.

Contenido

43-50

Diseño de un sistema de control y supervisión de estaciones de bombeo

*Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, Diego Alonso Ramos Acosta
y Henry Moreno Mosquera*

En este artículo se presentan el diseño y la construcción de un sistema que permite analizar y programar el control y la supervisión de una estación de bombeo, así como estudiar y evaluar el comportamiento de máquinas hidráulicas. El sistema tiene la posibilidad de configurar diferentes condiciones para las máquinas, en serie o en paralelo, con la opción de que cada unidad trabaje individualmente o en conjunto, para supervisar y establecer relaciones entre variables hidráulicas (caudal, presión, potencia, eficiencia, etc.), mecánicas (velocidad y torque) y eléctricas (corriente, voltaje, potencia, THD) involucradas en una estación de bombeo.

51-56

Actuadores de efecto Peltier: “La nevera del futuro”

Juan Manuel Andrade Morales

En este momento histórico los procesos de refrigeración se hacen comprimiendo y descomprimiendo gases (todos ellos con posibilidad de causar cáncer en animales y seres humanos).

Existe una esperanza de cambiar todos estos gases refrigerantes por dispositivos inocuos de estado sólido (actualmente van liderando la competencia las moléculas de telurio-bismuto y las moléculas de selenio-antimonio).

57-70

Evaluación de la rigidez a flexión 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 flexión de probetas tomadas de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. En un primer artículo se presentaron los resultados de ensayos a carga axial de probetas similares.

71 / ENTREVISTA

“Lo primordial es montar un sistema integrado de transporte público”

Angélica Castro Rodríguez

77 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

¿Solución facilista o subdesarrollista?

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Director de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*

jairo.romero@escuelaing.edu.co

La ingeniería de vías y transportes enseña que un sistema de transporte de calidad aceptable debe tener la capacidad de movilizar con prontitud a los usuarios y de absorber la demanda generada por el incremento en el número de vehículos y de pasajeros, así como en el aumento de carga.

Lo anterior implica darle un mantenimiento adecuado a la infraestructura vial, que permita garantizar, por lo menos, lo siguiente: cero huecos, cero inundaciones de las vías y cero estacionamientos sobre vías principales; señalización completa de las vías; semaforización sincronizada y proporcional a la demanda vehicular; paraderos definidos y espaciados convenientemente; vehículos de servicio público y escolar de capacidad adecuada, con conductores entrenados en forma apropiada; definición de la compatibilidad de uso vial para transporte público, escolar, particular, motociclistas y ciclistas.

Según la Veeduría Distrital, en el periodo 2004-2010 la malla vial de Bogotá creció 390 kilómetros, esto es, apenas un 2,7%, y el número de vehículos aumentó de 670.000 a 1.300.000, que representa un crecimiento del 91%. En el año 2011 se vendieron 325.000 autos en el país, 149.500 de ellos en Bogotá, es decir, un 46% del total nacional.

El incremento en el número de habitantes exige la pronta expansión de la infraestructura, ya que el retardo en

atender tal problema conduce a un mayor subdesarrollo, causado por la pésima administración de los recursos públicos y por la demora en satisfacer las necesidades de servicios públicos. Para esto se precisan acciones concretas de quienes toman las decisiones, es decir, de los políticos, así como diseños, construcción, operación y mantenimiento óptimo de los que proveen e implementan los proyectos requeridos.

Los estadistas de la capital del país han decidido cerrar los ojos ante la realidad vial de la ciudad e imponer la solución facilista o, mejor, subdesarrollista: cero nuevas vías, prohibición del uso vial por el ciudadano común (el alcalde, los funcionarios públicos, los vehículos blindados, los periodistas y demás privilegiados del Estado están exentos).

El mantenimiento inexistente o inadecuado, la ausencia de todas las medidas enunciadas con anterioridad y la perspectiva totalmente deprimente de movilidad futura permiten señalar como única opción trasladarse a vivir en otra ciudad y guiar el desarrollo hacia otra ubicación geográfica.

Con estadistas como los que Bogotá ha tenido en los últimos años, es posible concluir que se requiere una nueva capital de la república.

Comparación del comportamiento de elementos estructurales a escala de concreto convencional y de concreto con agregados reciclados*

Conventional concrete versus concrete with recycled aggregates: a comparison of the behavior of structural elements

PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA¹, NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ph.D., profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

2. M.Sc., profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

pedro.quiroga@escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2012 Aceptado: 18/03/2012

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

Resumen

Mientras en algunos países se recicla casi el 100% de los escombros de construcción y demolición (C&D), en Colombia sólo un pequeño porcentaje se recicla. Esto se debe a varias razones, entre las que se puede mencionar que la mayoría de los constructores, dueños y entidades públicas no sabe que se puede hacer concreto de buena calidad con agregados reciclados. Para promover el empleo de agregados reciclados en concreto estructural es necesario que los usuarios potenciales se familiaricen con el comportamiento de elementos estructurales hechos con este material. En 2010 se inició en el Laboratorio de Estructuras y Materiales, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, un programa experimental para ensayar elementos estructurales a escala de concreto con 20% de agregado reciclado (como remplazo de agregado grueso natural). Se presentan los resultados de cargas máximas y gráficas carga-desplazamiento de los diferentes elementos.

Palabras claves: agregado reciclado, sostenibilidad, elementos estructurales.

Abstract

While in some countries almost 100% of the construction and demolition (C&D) waste is recycled, in Colombia only a small portion is recycled due to various reasons, including that most contractors, owners and public agencies are unaware that good quality concrete can be made of recycled aggregates. To promote the use of recycled aggregates (RA) as a component of structural concrete it is necessary that users become familiar with the behavior of structural elements made of CRA. Beginning in 2010, as part of a graduate course, small-scale structural elements with CRA have been manufactured and tested at the structures laboratory of la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI). CRA was made replacing 20% of coarse aggregate by crushed concrete. In this paper, maximum loads and load-deflection curves are presented.

Keywords: recycled aggregate, sustainability, structural elements.

* Adaptación del artículo "Comparison of the Performance of Structural Elements Made with Regular Concrete and Concrete with Recycled Aggregates in Colombia", presentado en the Fourth International Conference on Non-Traditional Cement & Concrete. Brno, República Checa, 2011.

INTRODUCCIÓN

En Bogotá se producen alrededor de doce millones de toneladas al año de residuos de construcción y demolición (RCD), parte de los cuales se depositan en las escombreras autorizadas, parte en el relleno sanitario, parte en zonas públicas como humedales, bermas, zonas verdes y en lotes baldíos, y sólo una mínima parte se reutiliza. Al igual que en otras ciudades del mundo, la capacidad de escombreras y rellenos sanitarios podría llegar a su límite en pocos años. Por otro lado, también empiezan a escasear las fuentes de agregados cercanas a Bogotá; de hecho, se suelen traer agregados desde canteras situadas a más de 150 km.

La experiencia mundial indica que se puede reutilizar más del 90% de los RCD, ya sea como material para bases, subbases y rellenos o como agregado para concreto. En Colombia, sin embargo, apenas hay unos pocos ejemplos de uso de agregados reciclados en obras civiles (Bedoya, 2003). Algunas de las razones de esto son que constructores, dueños y la sociedad en general no saben que se puede hacer concreto de buena calidad con agregados reciclados, que las normas técnicas colombianas no incluyen estos agregados y que no existe un marco legal que regule e incentive el empleo de dichos agregados. El éxito de los programas de reciclaje de RCD en algunos países se debe a que la sociedad los apoya, que hay leyes que por ejemplo exigen clasificar los escombros en obra, o que obligan a reciclar todos los RCD, y que las normas técnicas establecen los requisitos para el uso apropiado de los agregados reciclados.

En los últimos años se han hecho en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECI) investigaciones dirigidas a evaluar propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con agregados o adiciones provenientes de la trituración de concreto, ladrillo y vidrio (Bojacá, 2008; Pinzón, 2009; Quiroga, 2010). El objetivo de estos proyectos es recolectar información que permita desarrollar guías de diseño y normas técnicas para concreto con agregados reciclados.

Para promover el uso de concreto con agregados reciclados, además de ensayos de laboratorio sobre el material, es importante realizar proyectos demostrativos que incluyan elementos estructurales, así como bloques y adoquines para que los usuarios potenciales puedan verificar el desempeño del concreto con agregados reciclados en la realidad. Por tal razón se decidió construir

y ensayar algunos elementos estructurales a escala en el Laboratorio de Estructuras, como parte del curso de posgrado Comportamiento plástico del concreto. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que el uso de agregados reciclados requiere ensayos que aseguren que no tendrán efectos negativos en el concreto. Estos ensayos no tradicionales deben hacerse tanto a los agregados como al concreto.

Este curso incluye una serie de sesiones de laboratorio para ilustrar experimentalmente algunos temas del curso, a saber: vigas continuas con diferentes distribuciones de refuerzo para estudiar la redistribución de momentos y la formación de rótulas plásticas; placas apoyadas en tres bordes para verificar resultados del método de las líneas de fluencia, y vigas altas y ménsulas para verificar resultados del método del puntal-tensor. En 2010 se decidió reproducir estos elementos con concreto con agregados reciclados, para lo cual un estudiante de la maestría en Estructuras construyó y ensayó los especímenes, y luego analizó la información (Arriaga, 2011).

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

Desde mediados de los años noventa, se han realizado en Colombia varios proyectos de investigación que han demostrado que es técnicamente factible producir concretos con agregados reciclados de la resistencia deseada. Sin embargo, para promover el uso de este material es necesario también estudiar el comportamiento estructural de elementos construidos con él. La experiencia mundial indica que las propiedades mecánicas del concreto con hasta 20% de remplazo de agregado grueso natural son similares a las del concreto convencional. El propósito es verificar si esto es válido para materiales y condiciones locales.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiales

Se utilizaron cemento comercial en bolsa, agregado grueso y fino de origen sedimentario proveniente del río Tunjuelo y agregado reciclado producido mediante trituración de cilindros de concreto previamente ensayados en el Laboratorio de Materiales. A continuación se presentan las principales características de los agregados (tabla 1).

Tabla 1
Características de los agregados

	Agregado grueso natural	Agregado grueso reciclado	Agregado fino natural
Tamaño nominal máximo (mm)	25	25	6.35
Densidad SSS (kg/m ³)	2450	2290	2530
Masa unitaria (kg/m ³)	1320	1130	1580
Absorción (%)	3,90	7,80	2,40
Coefficiente de forma	0,31	0,24	
Coefficiente de Los Ángeles (%)	30	40	
Coefficiente Micro-Deval (%)	16	31	

Se utilizaron barras corrugadas de $F_y = 420$ MPa y alambres corrugados de $F_y = 550$ MPa para el refuerzo principal, y alambres corrugados de $F_y = 550$ MPa para estribos.

Mezclas de concreto

Se hicieron dos tipos de mezclas de concreto, las cuales eran idénticas, excepto que en una se reemplazó 20% de agregado grueso natural por agregado reciclado. Las características de las mezclas se presentan a renglón seguido (tabla 2).

Tabla 2
Diseño de las mezclas

	Mezcla de concreto convencional	Mezcla de concreto con agregado reciclado
Relación agua-cemento, a/c	0,50	0,50
Agua (kg)	195	195
Cemento (kg)	390	390
Agregado fino (kg)	739	739
Agregado grueso (kg)	859	687
Agregado reciclado (kg)	0	155

Los elementos se fundieron y ensayaron en diferentes momentos de acuerdo con el calendario del curso. Se tomaron cilindros de cada mezcla y se les determinaron la resistencia a compresión y el módulo elástico el día en que se ensayaron los elementos estructurales, cuyos resultados se muestran en la tabla siguiente (tabla 3). Se puede observar que la resistencia a compresión y el módulo elástico de los dos tipos de concreto fueron similares para placas, ménsulas y vigas altas. En el caso de vigas continuas, la resistencia del concreto convencional fue mayor debido a que los elementos de concreto con agregados reciclados se fundieron unos días después.

Tabla 3
Propiedades del concreto

Elemento	Propiedad	Mezcla de concreto convencional	Mezcla de concreto con agregado reciclado
Vigas continuas	$f'c$ (MPa)	33 (25 d) ^a	24 (16 d) ^a
	E (GPa)	20	20
Placas en dos direcciones	$f'c$ (MPa)	18 (12 d) ^a	20 (13 d) ^a
	E (GPa)	15	15
Ménsulas y vigas altas	$f'c$ (MPa)	28 (32 d) ^a	28 (32 d) ^a
	E (GPa)	18	18

^a Edad del concreto en el momento del ensayo.

Elementos estructurales

Vigas continuas

El objetivo de esta práctica es comparar el comportamiento inelástico y la resistencia de dos juegos de tres vigas continuas con diferente distribución de refuerzo cada uno. Las vigas apoyadas en los extremos y en el centro se cargaron con cargas puntuales (figura 1). Se

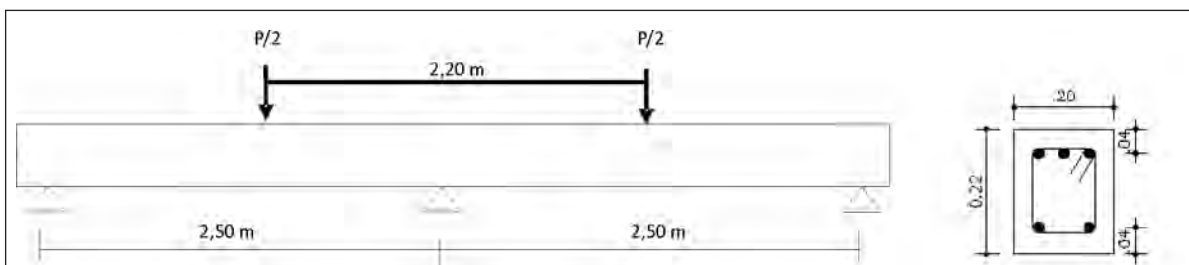


Figura 1. Esquema de las vigas continuas (dimensiones en m).

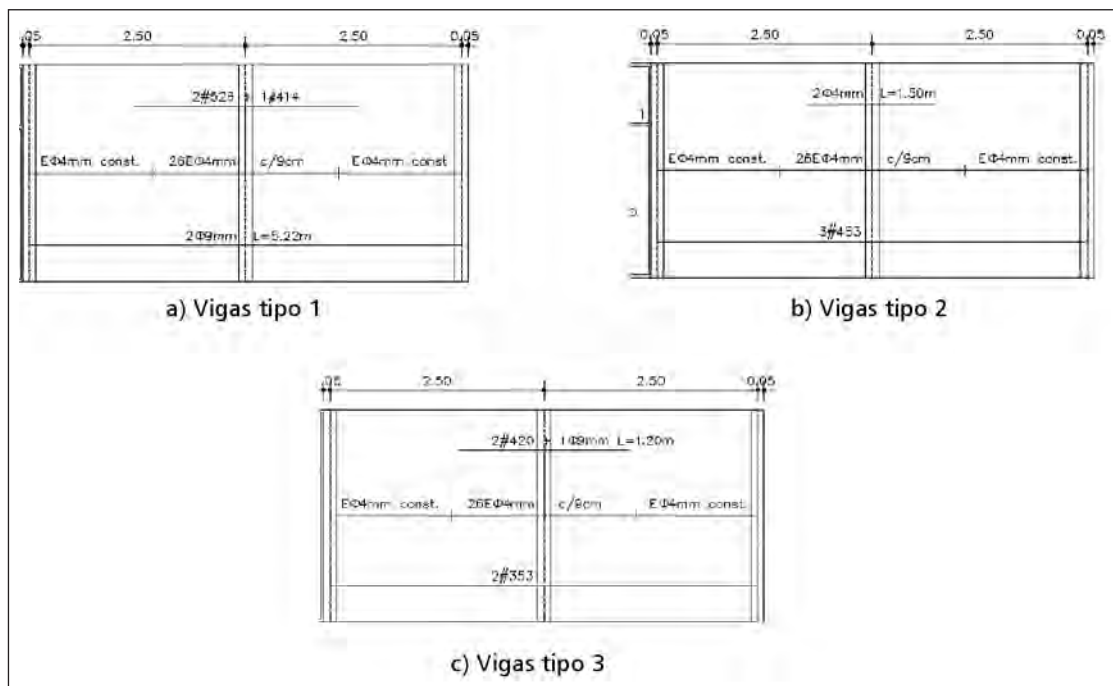


Figura 2. Refuerzo de las vigas continuas.

midieron deflexiones bajo las cargas con deformímetros mecánicos de 0,01 mm de precisión.

Un juego de vigas se hizo con concreto convencional y el otro con concreto con agregados reciclados. En cuanto al refuerzo de las vigas de cada juego, para las vigas tipo 1 el refuerzo negativo en el apoyo central es mucho mayor que el refuerzo positivo; para las vigas tipo 2, el refuerzo positivo es mucho mayor que el refuerzo negativo, y para las tipo 3, el refuerzo negativo es mayor que el positivo, pero éstos son más cercanos a lo requerido por un análisis elástico. Las vigas tipo 1 y tipo 3 tienen que desarrollar grandes curvaturas y rotaciones en las luces antes de que el acero negativo llegue al esfuerzo de fluencia, mientras que en las vigas tipo 2 hay que desarrollar grandes curvaturas y rotaciones en el apoyo central antes de que el refuerzo positivo alcance el esfuerzo de fluencia (figura 2).

Las cargas se incrementaron hasta el colapso de las vigas, definido como el punto en el cual las deflexiones aumentaban drásticamente para incrementos muy pequeños de carga o cuando la carga ya no se incrementaba. A continuación se pueden ver las cargas máximas obtenidas experimentalmente y las cargas calculadas teóricamente por el método del trabajo virtual (tabla 4), así como las gráficas carga-deflexión (figura 3).

Tabla 4
Cargas teóricas y experimentales

Viga	P teórica (kN)	P medida (kN)
CC-1	107	128
CC-2	116	110
CC-3	74	82
CRA-1	86	92
CRA-2	112	102
CRA-3	74	98

CC = vigas de concreto convencional.
CRA = vigas de concreto con agregados reciclados.

Se puede observar que las cargas reales se correlacionan aceptablemente con las cargas teóricas y en general las diferencias son menores que el 20%, excepto para la viga CRA-3, así como también se puede observar que para las vigas tipos 2 y 3 las resistencias para los dos tipos de concreto son similares. Para las vigas tipo 1, hay una diferencia importante entre la capacidad de la viga de concreto convencional y la de concreto reciclado, la cual sin embargo es consistente con la resistencia de dichos concretos en el momento del ensayo (edades diferentes).

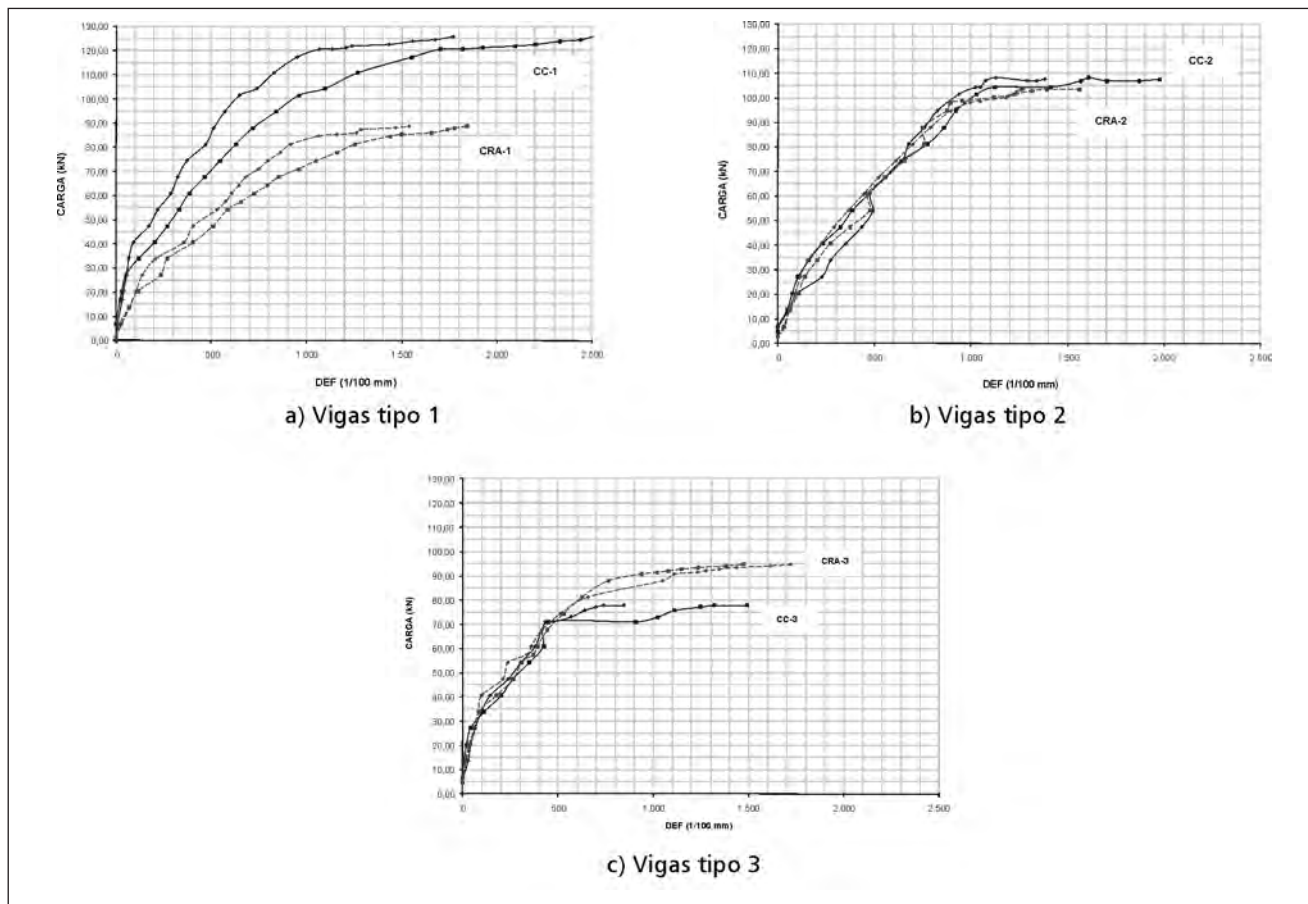


Figura 3. Deflexiones bajo las cargas puntuales de vigas continuas.

Placas en dos direcciones

El objetivo de esta práctica es comparar la carga máxima uniforme que resisten dos placas de concreto con diferente refuerzo, con la carga máxima determinada por medio del método de las líneas de rotura. Las placas eran de 2,0 m de largo por 0,90 m de ancho y 3 cm de espesor, y tenían tres bordes simplemente apoyados y un borde libre (figura 4). El refuerzo se colocó aproximadamente en la mitad de la altura.

Se procedió a construir dos juegos de placas: uno con concreto convencional y otro con concreto con agregados reciclados. Cada juego constaba de dos placas: una con refuerzo en una sola dirección (alambres corrugados de $\phi 6$ mm @ 15 cm) y la otra con refuerzo en dos direcciones (malla electrosoldada con alambres de $\phi 3$ mm @ 15 cm).

Las placas se cargaron en etapas hasta el colapso, utilizando agregado esparcido uniformemente sobre la placa. En cada etapa se medían las deflexiones en

el punto central del lado libre con un deformímetro mecánico. Usando el método de las líneas de rotura se determinaron teóricamente la carga máxima y el patrón de falla. A continuación se presentan los valores experimentales y teóricos de todas las placas (tabla 5), y se muestran las gráficas carga vs. deflexión (figura 4).

Tabla 5
Cargas distribuidas máximas

Placa	Refuerzo	Carga teórica (kN/m ²)	Carga real (kN/m ²)
CC-1	$\phi 6$ mm c/15 cm dirección larga	4.5	5.9
CC-2	$\phi 3$ mm @ 15 cm ambas direcciones	3.0	4.2
CRA-1	$\phi 6$ mm c/15 cm dirección larga	3.4	4.7
CRA-2	$\phi 3$ mm @ 15 cm ambas direcciones	3.5	4.7

CC = placas de concreto convencional.
CRA = placas de concreto con agregados reciclados.

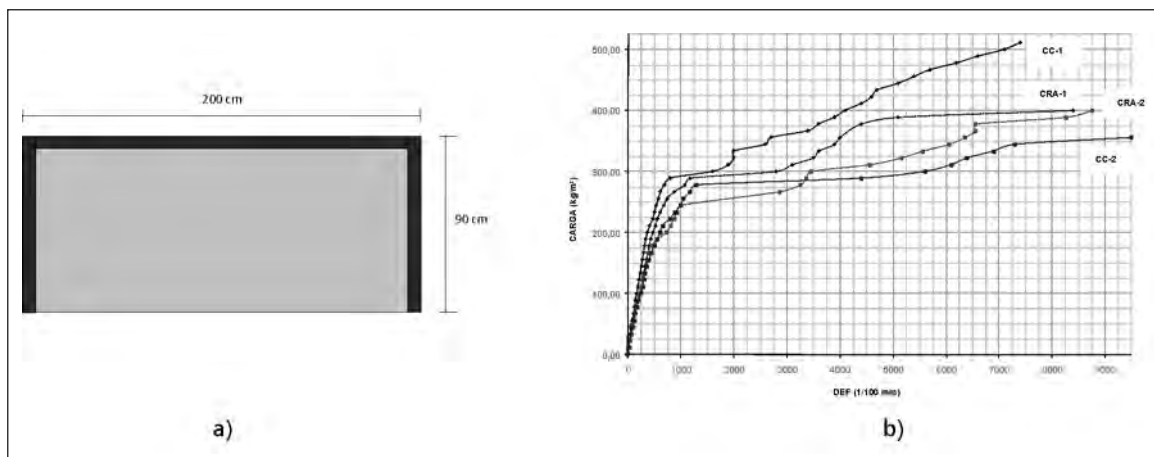


Figura 4. a) Esquema en planta de las placas. b) Gráfica carga uniforme vs. deflexión en la mitad del lado libre de las placas.

Se puede observar que las cargas experimentales son significativamente superiores a las teóricas (del orden del 30%), aunque proporcionales a éstas, y que las placas de concreto con agregados reciclados tienen resistencias similares a las de las placas de concreto con agregados reciclados. Para los cálculos teóricos se usó la posición real del refuerzo en las placas (esto explica las diferencias entre placas similares), en tanto que cálculos se hicieron con el valor medido de F_y ; sin embargo, probablemente el acero entró en la zona de endurecimiento por deformación en las regiones alrededor de las líneas de rotura, lo cual explicaría la diferencia entre los valores teóricos y los experimentales.

Ménsulas

El objetivo de esta práctica es comparar la carga máxima real de dos ménsulas con diferentes tipos de refuerzo con la carga teórica determinada mediante el método del puntal-tensor (tabla 6). Las gráficas carga vs. deflexión se muestran más adelante (figura 6).

Se construyeron dos juegos de dos ménsulas con los dos tipos de concreto. Las dos ménsulas de cada juego tienen el mismo refuerzo pero anclado en forma diferente. En una ménsula el refuerzo principal se soldó a una barra transversal y en la otra el anclaje del refuerzo principal se hizo mediante ganchos a 90° (figura 5).

Se puede ver que la resistencia de la ménsula CRA-1 de concreto con agregados reciclados fue significativamente menor que la ménsula CC-1 correspondiente, mientras que las resistencias de las ménsulas CC-2 y CRA-2 fueron similares. Después del ensayo se en-

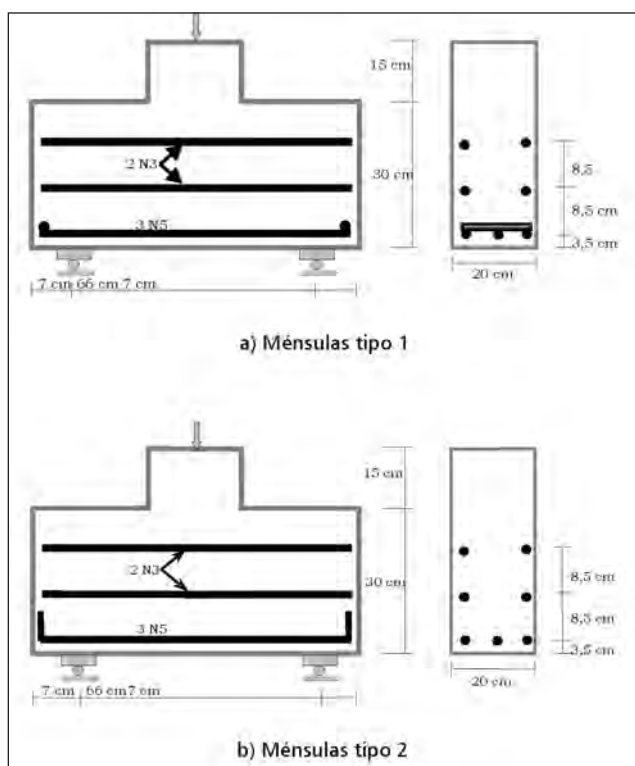


Figura 5. Detalle de ménsulas.

Tabla 6
Cargas teórica y experimental máximas de las ménsulas

Ménsulas	Carga teórica (kN)	Carga real (kN)
CC-1	242	244
CC-2	241	231
CRA-1	234	158
CRA-2	248	219

CC = ménsulas de concreto convencional.
CRA = ménsulas de concreto con agregados reciclados.

contró que el refuerzo de la ménsula CRA-1 se movió durante la fundida, por lo cual quedaron sin anclaje adecuado en uno de los lados. También se pudo observar que con la excepción de la ménsula mencionada, la predicción del modelo puntal-tensor fue muy cercana a los valores experimentales. Las curvas esfuerzo-deformación muestran que inicialmente las ménsulas de concreto convencional tenían la misma rigidez que las de concreto con agregados reciclados. Para cargas mayores, la ménsula CRA-2 se vuelve menos rígida que la correspondiente CC-2. Así mismo, se vio que las fisuras de las ménsulas CRA son más anchas que las de concreto convencional.

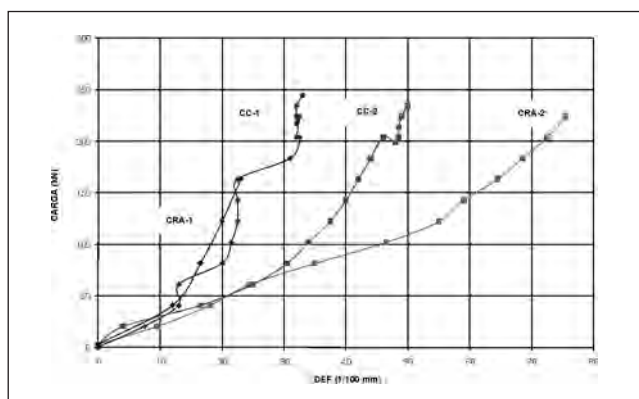


Figura 6. Gráficas carga-deflexión de ménsulas.

Vigas altas

El objetivo de esta práctica es comparar la carga última de dos vigas altas con diferentes tipos de refuerzo, con la carga teórica determinada mediante el método del puntal-tensor.

Se construyeron dos juegos de dos vigas altas con los dos tipos de concreto, las cuales tenían diferente refuerzo (figura 7). Ambas tenían el mismo refuerzo horizontal, pero las vigas tipo 2 tenían además refuerzo vertical.

Las vigas se cargaron gradualmente hasta el colapso con una máquina universal. Las deflexiones se midieron en la mitad de la luz, con un deformímetro mecánico. Más adelante se muestran las cargas máximas medidas y las calculadas (tabla 7).

Se puede ver que la resistencia real de las vigas de concreto con agregados reciclados fue un poco mayor que las de concreto convencional y que el modelo

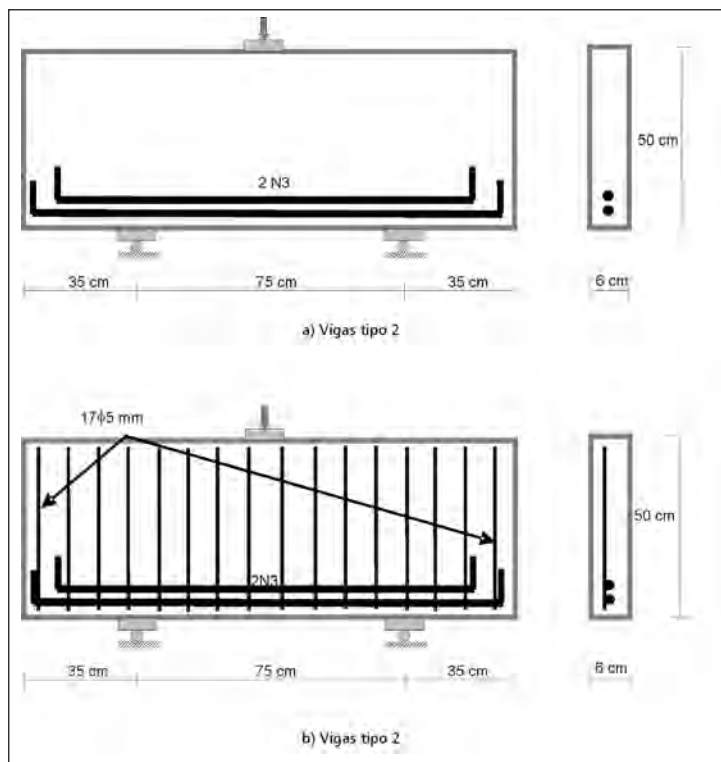


Figura 7. Detalle de vigas altas.

puntal-tensor predijo razonablemente bien las cargas máximas.

Tabla 7

Cargas máximas teóricas y experimentales de las vigas altas

Vigas	Carga teórica (kN)	Carga experimental (kN)
CC-1	129	118
CC-2	157	158
CRA-1	129	152
CRA-2	158	170

CC = vigas altas de concreto convencional.

CRA = vigas altas con agregados reciclados.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de ensayos de elementos estructurales a escala hechos con concreto con 20% de agregados gruesos reciclados como remplazo de agregado grueso natural, se puede concluir que la resistencia y la rigidez de este tipo de concreto son similares a las

de concreto convencional. En países como Alemania se permiten remplazos hasta de 45%, por lo cual se tiene planeado repetir estos experimentos con mayores contenidos de agregado reciclado. Se recomienda, igualmente, construir elementos estructurales y no estructurales en proyectos reales y monitorearlos para verificar su desempeño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arriaga, L. (2011). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado* (tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [2] Bedoya, C.M. (2003). *El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- [3] Bojacá, N. (2008). *Concreto sostenible como alternativa estructural, ambiental y económica en la construcción de obras* (trabajo de grado de especialización). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [4] Pinzón, H. (2009). *Valoración de algunas propiedades del concreto adicionado con vidrio pulverizado* (trabajo de grado de especialización). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [5] Quiroga, P. & Torres, N. (2010). *Concrete with aggregates from construction and demolition waste in Colombia*. Honors Session Proceedings. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona, Italia.
- [6] Quiroga, P. & Torres, N. (2011). *Comparison of the performance of structural elements made with regular concrete and concrete with recycled aggregates in Colombia*. 4th International Conference on Non-Traditional Cement & Concrete. Brno, República Checa.

Algunas prácticas asociadas con el desarrollo sostenible en pavimentos

Some practices associated with sustainable pavement development

SANDRA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ

Ingeniera civil, profesora titular y miembro del Consejo Directivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/03/2012 Aceptado: 05/04/2012

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

Resumen

La creciente demanda de una infraestructura vial con adecuada capacidad y funcionalidad, sumada a la imperiosa necesidad de conservar los recursos naturales, reducir el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), han puesto el concepto de sostenibilidad en el orden del día de la ingeniería de pavimentos.

El empleo de pavimentos asfálticos recuperados, de subproductos industriales y de materiales reciclados, el desarrollo de mezclas asfálticas tibias, los pavimentos perpetuos, los pavimentos porosos y los pavimentos silenciosos, son algunos ejemplos de las prácticas asociadas con el desarrollo sostenible en la construcción, conservación y rehabilitación de estructuras de pavimento que se describen de manera somera en este artículo, indicando algunos de sus beneficios y limitaciones.

Palabras claves: sostenibilidad, pavimentos, mezclas asfálticas, reciclaje.

Abstract

The growing demand for road infrastructure with adequate capacity and functionality, in addition to the need for preserving the natural resources, reduce energy consumption and greenhouse gas emissions, has put the concept of sustainability on the agenda of pavement engineering.

Some examples of practices associated with sustainable development in the construction, maintenance and rehabilitation of pavement structures include the use of reclaimed asphalt pavements, industrial by-products and recycled materials, the development of Warm Mix Asphalt, perpetual pavements, porous pavements and quiet pavements. This article describes briefly these practices, highlighting some of their benefits and limitations.

Keywords: sustainability, pavements, asphalt mix, recycling.

“Nosotros no hemos heredado la tierra de nuestros ancestros, la hemos tomado prestada de nuestros hijos”.

Antoine de Saint-Exupéry

INTRODUCCIÓN

A medida que se ha venido dando el debate de las causas del calentamiento global y del cambio climático, el término *sostenible*¹ se ha convertido en una expresión cotidiana en la concepción y en el desarrollo de proyectos de ingeniería, particularmente en ingeniería de pavimentos.

Existen muchas definiciones de sostenibilidad y, en pavimentos, la definición más popular hace referencia a que un pavimento sostenible es aquel en el que se minimizan los impactos ambientales, por medio de la reducción en el consumo de energía, en el uso de recursos naturales y en las emisiones, mientras cumple con todas las condiciones y estándares de desempeño. Un pavimento sostenible es un pavimento seguro, eficiente y respetuoso del ambiente, que satisface las necesidades actuales del transporte, sin poner en peligro la capacidad para cumplir con tales requerimientos en el futuro (Brundtland Commission).

La anterior definición de un pavimento sostenible tiene un claro enfoque: minimizar los impactos negativos ambientales, económicos y sociales que se generan durante todo el ciclo de vida del pavimento, el cual comprende desde la extracción y el procesamiento de las materias primas (crudos de petróleo, minerales, etc.), la manufactura de materiales tales como el cemento, el concreto o el asfalto para su construcción, su transporte y disposición en el sitio del proyecto, la construcción, la operación o fase de servicio, y los trabajos de mantenimiento hasta el final de la vida de servicio. En la práctica, se puede decir que la mayoría de los pavimentos no tienen un término, ya que normalmente son reconstruidos para continuar en operación.

En cada una de las fases del ciclo de vida de un pavimento se presentan diferentes niveles de consumo de recursos naturales y de energía, de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (*Greenhouse Gases*, GHG), de afectación o contaminación del aire y de

fuentes de agua o de los suelos, de impactos sobre la salud, la seguridad y el confort de los usuarios de la carretera, entendiéndose como usuarios no sólo aquellos que transitan directamente sobre ésta, sino también los que habitan en su vecindad. En las últimas décadas se han hecho considerables esfuerzos para optimizar, reducir, limitar o mejorar los aspectos anteriores, según sea el caso; por ejemplo, optimizar el consumo de los recursos naturales y de energía, reducir las emisiones de GEI, limitar la contaminación o mejorar la seguridad y el confort de los usuarios, para lograr así la esencia de un pavimento sostenible.

En general, en algunos países, el Estado, la industria asociada a las carreteras, los centros de investigación y las universidades han puesto especial énfasis en la investigación y en el desarrollo de materiales, de tecnologías y de procesos para la construcción sostenible de pavimentos, que incluyen la evaluación de técnicas de estabilización de suelos para el aprovechamiento de materiales locales, el empleo de materiales reciclados y de subproductos industriales, el estudio y la aplicación de mezclas asfálticas tibias, el *rubblizing* y el reciclaje con asfalto espumado, por mencionar algunos. Igualmente, con enfoque sostenible, se han elaborado metodologías de diseño y construcción de estructuras de pavimento, procurando que éstas sean más durables y funcionales, entre las que cabe mencionar los pavimentos perpetuos, porosos o drenantes, y los silenciosos.

Algunos de los materiales, tecnologías y procesos asociados con la sostenibilidad en pavimentos, junto con la configuración de estructuras de pavimento relacionadas también con este aspecto, resultan novedosos en el medio colombiano, por lo que la intención de este artículo es presentar una visión somera de algunos de ellos, mostrando las oportunidades y herramientas con las que los ingenieros de carreteras cuentan hoy en día para realizar prácticas denominadas sostenibles.

MATERIALES

Pavimentos asfálticos recuperados (RAP)

Autopistas, calles, caminos de acceso, pistas aéreas, parqueaderos, protecciones portuarias, revestimientos de canales, vías peatonales y ciclovías, canchas deportivas, entre otra infraestructura, tienen por superficie capas asfálticas, las cuales son el resultado de la mezcla, de 95% de agregado mineral con 5% de cemento asfáltico,

1. “Dicho de un proceso: Que puede mantenerse por sí mismo”. *Diccionario de la lengua española*, 22.^a ed. Madrid: Real Academia Española.

aproximadamente. Ambos productos son considerados recursos no renovables.

Europa y Norteamérica tienen, de lejos, las redes de carreteras pavimentadas más extensas del mundo. Se estima que más del 90% de la longitud total de carreteras en el Antiguo Continente y en Estados Unidos (5,2 millones de km y 4 millones de km, respectivamente) se encuentra pavimentado con mezclas asfálticas. La situación con respecto a la frecuencia del tipo de superficie de las carreteras pavimentadas es muy similar en los demás países.

En 2007, último año del cual se dispone de estadísticas, se produjeron aproximadamente 1600 millones de toneladas de mezcla asfáltica en el planeta, con la distribución que se muestra en la figura 1 (1). Las cifras anteriores hablan por sí solas de la magnitud de la industria de las mezclas asfálticas.

A medida que la infraestructura vial se envejece y se deteriora, se requiere invertir en más materiales; agregados, asfaltos y mezclas asfálticas para su mantenimiento, su rehabilitación o reconstrucción. De acuerdo con la política de materiales reciclados de la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos, los mismos materiales usados en la construcción de la carretera se pueden reutilizar para su reparación o para la construcción de otras carreteras. Es así como las mezclas asfálticas que se retiran normalmente de los pavimentos deteriorados se han convertido, una vez procesadas, en el material de mayor volumen de reciclaje.

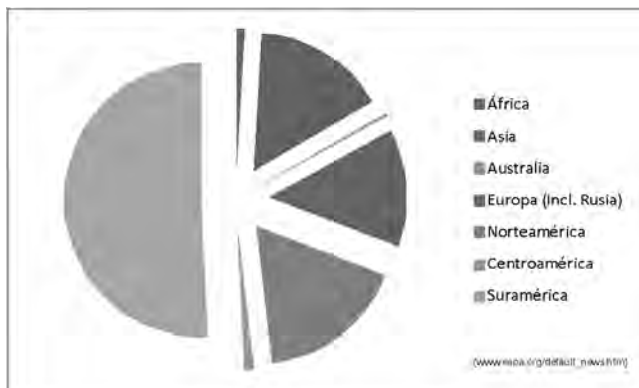


Figura 1. Producción mundial estimada en el 2007, en millones de toneladas de mezcla asfáltica (1).

Los pavimentos asfálticos recuperados, conocidos como RAP por su sigla en inglés (*Reclaimed Asphalt Pavements*), son una manera eficiente de reducir la demanda

de agregados vírgenes y de asfalto, productos que normalmente son escasos en muchas regiones y, como ya se mencionó, considerados recursos no renovables. Se estima que 30.000 toneladas de RAP son equivalentes a 70 carrotanques de 6.000 galones de asfalto y a un poco más de 28.000 toneladas de agregado. El empleo de RAP permite eliminar los costos de transporte para su disposición en botaderos o rellenos, reduce los costos de explotación y procesamiento de materiales para la elaboración de mezclas asfálticas o para la construcción de bases o subbases, e incluye el beneficio de poderlo almacenar en una planta central para su aplicación posterior (fotografía 1).



Fotografía 1. Centro de acopio de RAP, Instituto de Desarrollo Urbano.

Muchas agencias viales del mundo están promoviendo el empleo de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente (*Hot Mix Asphalt*, HMA). Según la National Asphalt Pavement Association (NAPA) (2), en Estados Unidos aproximadamente 100 millones de toneladas de pavimentos deteriorados se recuperan cada año, de los cuales unos 60 millones de toneladas se utilizan en la fabricación de mezclas asfálticas nuevas y las restantes en otras aplicaciones relacionadas con las carreteras, como la construcción de bases o de subbases granulares, de bases estabilizadas, o como material para terraplén o de relleno.

Algunos aspectos que han limitado el uso extensivo de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas están asociados con la falta de calidad y de homogeneidad del producto, con la ausencia de procedimientos estandarizados para el diseño de las mezclas, así como con el desconocimiento sobre la durabilidad y sobre el comportamiento de las mezclas con RAP. Sin embargo, a través del programa de evaluación de desempeño

de pavimentos a largo plazo (*Long Term Pavement Performance*, LTPP), realizado en los Estados Unidos, se ha determinado que los pavimentos construidos con mezclas asfálticas que contienen hasta un 30% de RAP han mostrado un desempeño similar al de pavimentos con mezclas asfálticas elaboradas en su totalidad con agregados vírgenes. El porcentaje de RAP empleado en la fabricación de mezclas asfálticas normalmente también se ha restringido debido a limitaciones en las especificaciones, a la falta de procesamiento o de disponibilidad de RAP y, en algunos casos, a los no muy favorables resultados de experiencias anteriores.

Subproductos industriales y materiales reciclados

En varios países, además de tratar de aprovechar racionalmente los recursos naturales locales, se tienen en la actualidad políticas y acuerdos específicos que regulan el uso de subproductos industriales y de materiales reciclados, como materiales para la construcción de carreteras. En las últimas décadas se ha apreciado un fuerte desarrollo a este respecto.

A medida que los agregados vírgenes se hacen más escasos y el volumen de los residuos y de los subproductos industriales generados por la sociedad, junto con los costos para su disposición, continúan en aumento, muchos gobiernos están ejerciendo una mayor presión y ofreciendo incentivos para recuperar y reciclar diferentes residuos y subproductos industriales, para usarlos en las carreteras, donde se requieren grandes volúmenes de materiales para su construcción y mejoramiento.

Entre los subproductos industriales y materiales reciclados de mayor uso en carreteras, además del RAP ya mencionado, se destacan las escorias de alto horno, las cenizas volantes de carbón, los residuos de procesamiento de minerales, los hormigones o concretos de cemento pórtland reciclados, los desechos de llantas o polvo de neumáticos y los residuos de vidrio, las lozas cerámicas y las tejas asfálticas, por mencionar algunos. Las aplicaciones para la construcción de carreteras abarcan desde terraplenes o rellenos y capas de base o de subbase, hasta la fabricación de concretos asfálticos o de concretos hidráulicos.

Por ejemplo, el vidrio es un material que se puede reciclar varias veces sin que pierda sus propiedades originales, siendo un agregado ideal en pavimentos. Los fragmentos de concreto resultantes de la demolición de

aceras, de canales o de las mismas losas del pavimento también se han empleado en remplazo de agregados vírgenes en varias aplicaciones, y se están haciendo investigaciones para su utilización en la elaboración de mezclas de concreto hidráulico.

De particular relevancia se ha convertido el uso de llantas de desecho en pavimentos, teniendo en cuenta los volúmenes que se disponen cada año a nivel mundial. Tan sólo en Estados Unidos y en Canadá se desechan 300 millones de llantas cada año, aproximadamente una llanta por persona, lo que representa un problema significativo para su disposición (3, 4).

El polvo de neumático, incorporado en la elaboración de mezclas asfálticas, bien sea en un proceso en húmedo donde se mezcla a altas temperaturas con el asfalto y parcialmente reacciona con éste para modificar sus propiedades (denominado asfalto - caucho), o en un proceso en seco, donde se incorpora como un agregado antes de añadir el asfalto, ha demostrado algunos beneficios, como la disminución de la susceptibilidad térmica de las mezclas y de la probabilidad de que presenten fatiga o ahuellamiento, cuando el proceso se realiza en húmedo. Algunas aplicaciones específicas del asfalto - caucho son el sellado de juntas y grietas, los tratamientos superficiales y las denominadas membranas de absorción de esfuerzos (*Stress Absorbing Membrane*, SAM), o las membranas intercapa para absorción de esfuerzos (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*, SAMI), así como las mezclas asfálticas en caliente de gradación discontinua y las de gradación abierta o mezclas asfálticas porosas, que se tratarán someramente más adelante.

En la gran mayoría de los casos, las principales limitantes para la aplicación generalizada de los subproductos industriales y los materiales reciclados son su limitada disponibilidad para aportar los grandes volúmenes requeridos en un proyecto carretero y los altos costos asociados con su procesamiento.

Mezclas asfálticas tibias (WMA)

Las mezclas asfálticas tibias (*Warm Mix Asphalt*, WMA) nacieron formalmente en Europa a finales de la década de los noventa, en respuesta a exigencias de tipo ambiental, energético y económico, teniendo desarrollos importantes en Noruega, Alemania, Bélgica y Francia, aunque se sabe de experiencias exitosas realizadas en Australia y Suráfrica, en años anteriores.

La premisa básica que encierra la tecnología de las WMA es lograr reducir la viscosidad del asfalto durante la producción de la mezcla, de modo que pueda ocurrir un cubrimiento completo de los agregados por el cemento asfáltico a una menor temperatura. WMA es un término genérico utilizado para describir una gran variedad de tecnologías que permiten a los productores de HMA reducir las temperaturas a las cuales se mezclan los materiales —agregados pétreos y asfalto— y se colocan en la carretera. Las reducciones de temperatura con respecto a las HMA varían, aproximadamente, entre 17 y 55 °C, dependiendo de la tecnología usada. En la figura 2 se presentan, de manera resumida, algunas categorías de WMA, junto con los principales nombres comerciales con que se conocen las técnicas y los aditivos.

Algunas ventajas que presentan las WMA, asociadas con la reducción de la temperatura en el proceso de mezcla y colocación, son las siguientes:

- Durante la producción y la aplicación, las emisiones de CO₂, SO₂, polvo, olores, entre otras, se reducen en forma significativa (aproximadamente en un 30 a 90%, dependiendo de la tecnología).
- El consumo de combustible y de energía se reduce en un orden del 30% y, por lo tanto, bajan los costos de fabricación.
- Se reduce el envejecimiento del cemento asfáltico y posiblemente se mejora la resistencia al agrietamiento.
- Se genera menor desgaste de la planta de fabricación.
- Permiten mayores distancias de acarreo en razón de que se reduce la velocidad de enfriamiento de la mezcla.
- La temporada de pavimentación se extiende, debido a que es posible realizar la mezcla a temperaturas más frías.
- Se reducen los riesgos de salud para los trabajadores y se da un ambiente de trabajo más confortable.

Otras ventajas asociadas a la técnica de las WMA incluyen:

- Se trabajan los mismos protocolos usados para el diseño de HMA.
- Presentan menor adherencia a los equipos de extendido y compactación.

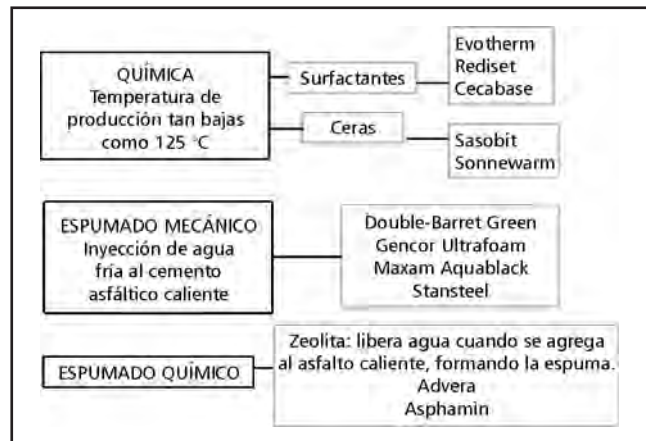


Figura 2. Categorías usuales, algunas técnicas y aditivos de las WMA.

- Se tiene la posibilidad de incluir una mayor cantidad de material de reciclaje (RAP).
- Se mejora la compactación de mezclas rígidas.
- Se pueden extender en espesores más gruesos y abrir la capa al tránsito en un periodo más corto.

TECNOLOGÍAS DE PAVIMENTO

Pavimentos asfálticos perpetuos o pavimentos de larga vida

Los pavimentos asfálticos perpetuos corresponden a un concepto introducido formalmente en el año 2000 por la Asphalt Pavement Alliance (APA), organización que los definió como pavimentos asfálticos diseñados y construidos para durar más de 50 años, sin requerir una rehabilitación estructural o una reconstrucción, necesitando únicamente una renovación periódica de su superficie, atendiendo las fallas confinadas exclusivamente a la parte superior del pavimento.

El concepto de los pavimentos perpetuos se ha derivado de los pavimentos de espesor pleno en concreto asfáltico (*Full Depth*) y de los pavimentos asfálticos de resistencia profunda (*Deep - Strength*) (figura 3), construidos desde los años sesenta en los Estados Unidos. La premisa básica del diseño de estas estructuras es que se pueden evitar las fallas estructurales con origen profundo si se mantienen los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones por debajo de los umbrales donde las fallas comienzan a ocurrir. En otras palabras, fallas tales como fisuración y deformaciones plásticas o ahuellamiento se confinan a la superficie de la estructura del pavimento (fotografías 2 y 3), por lo que solamente la

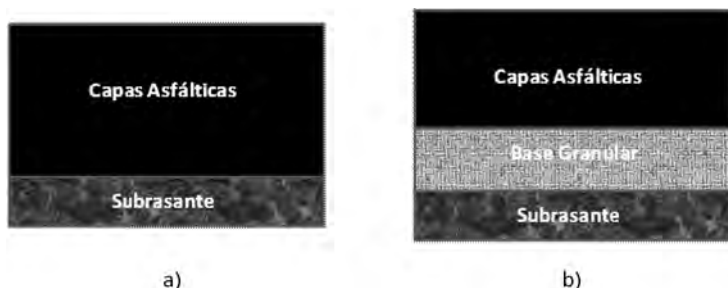


Figura 3. a) Estructura con espesor pleno en concreto asfáltico. b) Estructura de un pavimento con resistencia profunda.



Fotografía 2. Fisuración de arriba hacia abajo (5).



Fotografía 3. Ahuellamiento no estructural (5).

superficie requiere una renovación periódica, mientras que el grueso de la estructura permanece intacto.

Entre las principales ventajas que presentan los pavimentos perpetuos se encuentran las siguientes:

- Menores costos del ciclo de vida, ya que se evitan las reparaciones profundas o la reconstrucción del pavimento, haciendo un mejor uso de los recursos, con un menor costo incremental para la renovación de la superficie.
- Reducción de las demoras causadas a los usuarios, debido a que las operaciones de rehabilitación

son de menor magnitud, con el consecuente menor tiempo en su ejecución.

- Bajo impacto ambiental por la reducción de la cantidad de materiales requeridos en la vida del pavimento, pudiéndose reciclar el material retirado.

Los pavimentos perpetuos no son una utopía. Desde la introducción del concepto en el año 2000, la APA ha otorgado 69 premios a diferentes carreteras en Estados Unidos que cumplen con este criterio. En la fotografía 4 se muestran algunos ejemplos de las carreteras que recibieron este galardón en el año 2009.

En Europa también se han efectuado investigaciones alrededor de las metodologías de diseño, materiales, procesos constructivos y estrategias de mantenimiento para lograr pavimentos más durables o pavimentos de larga vida, que requieran reparaciones y rehabilitaciones menos frecuentes, y que sean seguros, generen menos ruido y colaboren con la mitigación de las congestiones.

Pavimentos permeables, porosos o drenantes

De manera general, los pavimentos permeables, porosos o drenantes, además de servir al tránsito, tienen como función el manejo de aguas lluvias. En éstos, el agua circula a través de los poros de una, de varias o de todas las capas del pavimento y es evacuada con rapidez a las zonas laterales de la calzada, o eventualmente se infiltra dentro del suelo subyacente o suelo de subrasante. La función primaria de estas estructuras de pavimento es la reducción de los volúmenes de escorrentía. En algunos casos, los diseños también persiguen el control de sedimentos, la remoción de contaminantes y la carga de nutrientes.

Hay varios tipos de pavimentos permeables, dentro de los que se encuentran los que tienen por superficie de rodadura hormigones porosos, concretos asfálticos porosos o drenantes, adoquines con entrelazado permeable, conocidos también como PICP (*Permeable Interlocking Concrete Pavers*), mallas o rejillas de concreto o de plástico llenas de agregados o de vegetación, y pasto reforzado con malla de plástico. Algunas de estas superficies se aprecian en la secuencia fotográfica 5.

Algunos autores consideran que, en un sentido estricto, los pavimentos porosos son una estructura en la que todas las capas que lo constituyen son permeables



Highway 134-North, Miller County, US 71, Section 2 - Arkansas State Highway and Transportation Department.

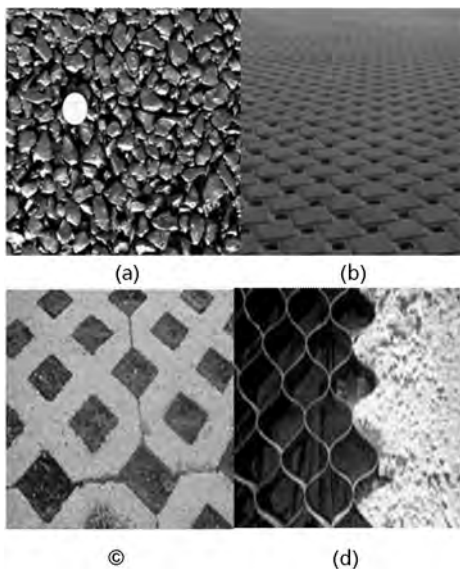
Louisville - Tennessee Road, I-65, Hart County - Kentucky Transportation Cabinet.

Fotografía 4. Ejemplos de algunas carreteras catalogadas por la APA como pavimentos perpetuos en 2009 (6).

y permiten la circulación del agua a través de ellas y no solamente es drenante la capa de rodadura. En la figura 4 se comparan las permeabilidades de cada una de las capas entre una estructura de un pavimento asfáltico tradicional, de un pavimento con una capa asfáltica drenante, denominada capa friccionante de gradación abierta (*Open Graded Friction Course, OGFC*), y de un pavimento en esencia poroso, destinado principalmente al tránsito de vehículos livianos (automóviles), por lo que su aplicación se ha limitado a parqueaderos, vías residenciales, peatonales y ciclorrutas. En la figura 5 se muestra una estructura típica de un pavimento poroso

con superficie de adoquines con entrelazado permeable (PICP).

Los pavimentos porosos presentan varios beneficios, como la reducción de la escorrentía de aguas lluvias, de la temperatura del pavimento, de la erosión del suelo y de la infraestructura tradicional para el manejo de aguas lluvias, al igual que de la necesidad de uso de sal y arena durante el invierno. Así mismo, permiten la recarga de acuíferos y, si son apropiadamente diseñados, es posible reducir la contaminación del agua subterránea. Al igual que en las estructuras de pavimentos con superficie drenante, se mejoran los aspectos de seguridad, dado que se incrementa la tracción de los vehículos cuando la superficie está húmeda y se reducen las salpicaduras.



Secuencia fotográfica 5. a) Concreto asfáltico poroso. b) PICP. c) Malla de concreto. d) Malla de plástico.

	Tradicional	OGFC	Poroso
	Pesados	Pesados	Automóviles
Capa de Rodadura	Impermeable	Permeable	Permeable
Capa de Liga	Impermeable	Impermeable	Permeable
Base Gradada	Impermeable (Estructural)	Impermeable (Estructural)	Permeable (Reservorio)
Subrasante	Estabilizada	Estabilizada	Sin compactar

Figura 4. Permeabilidad de las capas de diferentes estructuras de pavimento.



Figura 5. Estructura típica de un pavimento poroso del tipo PICP (7).

Entre las limitaciones de estas estructuras de pavimento cabe citar su alto costo inicial y el requerimiento más exigente de un mantenimiento periódico para evitar su colmatación.

Una superficie de rodadura asfáltica drenante que se ha desarrollado en los últimos años corresponde a las denominadas capas friccionantes de gradación abierta (OGFC), las cuales tienen una serie de ventajas, como las siguientes: eliminan el hidroplaneo, presentan mayor resistencia al deslizamiento cuando la superficie se encuentra mojada, disminuyen las proyecciones de agua —mejorando así considerablemente la visibilidad durante tiempo lluvioso—, generan menor deslumbramiento por los faros de los vehículos, reducen el ruido al paso del vehículo, son más durables al tener una mayor película de asfalto cubriendo los agregados, presentan mayor resistencia al ahuellamiento y permiten mantener la velocidad de circulación en tiempo húmedo, reduciéndose de esta manera también las congestiones.

Sin embargo, las OGFC tienen una serie de limitaciones, como un mayor costo inicial, requieren diseños geométricos más rigurosos y drenajes laterales, pueden presentar pérdida de drenabilidad al colmatarse con el tiempo y su conservación es más exigente.

Pavimentos silenciosos

El ruido que genera el tránsito de los vehículos por las carreteras afecta el confort, la salud y el estándar de vida de la población vecina a ellas. En las últimas décadas, este aspecto se ha convertido en la mayor preocupación ambiental, especialmente en las áreas urbanas, debido a que con el incremento en los volúmenes de tránsito, el problema se está haciendo más grave.

En una carretera se tienen diferentes fuentes de ruido, como el generado por el motor del vehículo, por el escape o por la interacción entre las llantas del vehículo y la superficie del pavimento. Cuando los vehículos circulan a altas velocidades, esta última fuente se destaca sobre las dos anteriores, por lo que una selección apropiada de la superficie de rodadura del pavimento resulta ser una consideración importante en el momento de buscar soluciones para mitigar el ruido.

Atendiendo esta preocupación, existe una fuerte tendencia en Estados Unidos, y principalmente en Europa, a construir pavimentos con superficies de rodadura que posean una mayor capacidad de absorber las ondas sonoras. De ahí ha nacido el concepto de los pavimentos silenciosos, los cuales se perciben como una medida adicional y económicamente más efectiva que otras empleadas para la mitigación del ruido, como las paredes o barreras acústicas, las fachadas de aislamiento o los muros de tierra.

De manera general, se ha establecido que un pavimento puede entrar en la categoría de silencioso cuando con su superficie de rodadura se logra disminuir el nivel de ruido en más de 3 dB(A)², si se le compara con una superficie de referencia, que normalmente corresponde a una mezcla asfáltica densa en caliente (HMA). A primera vista, esta disminución parecería insignificante, pero basta con recordar que la escala de sonido es logarítmica y que una duplicación del sonido está representada por un incremento de 10 dB(A), o que una reducción del orden de tan sólo 3 dB(A) es equivalente a duplicar la distancia entre el receptor y la fuente o, para el caso de carreteras que se discute, a disminuir el tránsito a la mitad.

Las mezclas porosas —entre éstas las ya mencionadas capas friccionantes de gradación abierta OGFC—, las mezclas asfálticas de matriz de piedra (*Stone Matrix Asphalt*, SMA) y las capas asfálticas delgadas (2 a 3 cm de espesor) o ultradelgadas (del orden de 1,5 cm), corresponden, en su orden, a las técnicas más empleadas como superficies de rodadura en los pavimentos silen-

2. Decibeles - dB(A): término comúnmente usado para representar el nivel de ruido percibido por el oído humano. (A) indica que la escala ha sido ajustada para la audición de los humanos.



a) Ampliación del anillo vial alrededor de la ciudad de Copenhague (Dinamarca). Capas asfálticas delgadas. b) Sección de ensayo en carretera al norte de Estocolmo. Capas asfálticas porosas.

Fotografía 6. Experiencias con pavimentos silenciosos en Europa (9).

ciosos. Estudios efectuados en Europa y en Estados Unidos (8) han concluido que, en promedio, se obtienen reducciones en el nivel de ruido de más de 3 dB(A) con las OGFC y de 2 dB(A) con las SMA como superficies de rodadura, frente a una superficie construida con mezcla asfáltica densa en caliente (HMA), tomada como referencia. En cambio, con las superficies construidas con hormigón o losas convencionales de concreto hidráulico se presentan los mayores niveles de ruido, del orden de 3 dB(A) por encima del percibido con la superficie de referencia en HMA.

La tendencia naciente en Europa, en cuanto a pavimentos silenciosos se refiere, es a usar capas delgadas con textura negativa (depresiones), elaboradas con mezclas asfálticas de gradación discontinua y agregados de menor tamaño (0/4 a 0/10 mm), en áreas urbanas y sujetas a fuertes inviernos, con acumulaciones de nieve y de hielo, mientras que en áreas rurales y en vías de alta velocidad (superiores a los 72 km/h), donde se tengan condiciones de invierno moderadas, se prefiere el empleo de una o dos capas de mezclas asfálticas altamente porosas (vacíos superiores al 18%).

En la fotografía 6 se presentan algunas experiencias con pavimentos silenciosos desarrolladas en Europa. En la fotografía 6 a) se muestra el proyecto de ampliación, de cuatro a seis carriles, del anillo vial de la ciudad de Copenhague, en Dinamarca. El anillo se emplaza en una zona residencial densamente construida y, para mitigar el ruido, en el proyecto se combina el uso de capas asfálticas delgadas reductoras de ruido, con barreras y fachadas de aislamiento. En la fotografía 6 b) se aprecia una sección de prueba con una y dos capas asfálticas porosas en una carretera al norte de Estocolmo (9).

En pavimentos de hormigón también se han desarrollado tecnologías tendientes a disminuir los niveles

de ruido generado en la interfaz llantas - pavimento, como los concretos con agregados expuestos, aplicados en construcciones nuevas, o las técnicas de pulido de la superficie con diamante para la rehabilitación de pavimentos existentes.

CONSIDERACIONES FINALES

El empleo de materiales no tradicionales, tales como subproductos industriales y materiales reciclados, en las estructuras de pavimento de las carreteras tiene grandes perspectivas. Muchos gobiernos están generando políticas relacionadas con la limitación de los volúmenes de disposición de estos materiales en rellenos y promoviendo su utilización en diferentes aplicaciones, lo que ha motivado su desarrollo. Por ejemplo, después de que se definió la legislación europea con respecto a la cantidad de RAP que se puede enviar a los sitios de disposición, su empleo comenzó a ser más efectivo y ha estado acompañado de desarrollos tecnológicos significativos.

La falta de experiencia y de habilidades técnicas, la escasez de estándares, de guías y de especificaciones, la insuficiencia de datos técnicos de desempeño bajo diferentes condiciones climáticas, la incertidumbre en aspectos de ingeniería y, en algunos casos, la mala publicidad debida a fallas experimentadas en el pasado, son factores que obstaculizan el desarrollo y el empleo de materiales no tradicionales, así como de técnicas de diseño y de procesos constructivos innovadores en carreteras.

Debe tenerse presente que aun para los materiales no tradicionales y las técnicas de diseño y construcción ampliamente usados no hay que confiar exclusivamente en la experiencia de otros países, por lo que se necesita

tomar precauciones y efectuar los estudios de laboratorio y las experiencias de campo bajo las condiciones locales.

A nivel mundial se está llevando a cabo un volumen importante de investigaciones sobre materiales, métodos de diseño, tecnologías, procesos constructivos, conservación y rehabilitación de pavimentos que persiguen hacer la infraestructura vial más sostenible. Sin embargo, es importante recordar que un pavimento sostenible no es sinónimo de construcción sostenible de pavimentos. Diversos estudios han demostrado que los impactos adversos ambientales, económicos y sociales asociados con la construcción de un pavimento son mucho menores que aquellos generados por el tránsito total acumulado en la fase operacional o de servicio. Por ejemplo, el estado o condición del pavimento en servicio afecta directamente el consumo de combustible de los vehículos y puede traer como consecuencia un mayor impacto social adverso sobre los aspectos de seguridad, confort, salud, tiempos de viaje o demoras generadas a los usuarios, a causa de reparaciones frecuentes, haciendo de esta manera al pavimento no sostenible.

La consideración anterior pretende generar conciencia en el sentido de que si no se tienen en cuenta y cuantifican los impactos negativos durante la fase de servicio de un pavimento, con el propósito de darles solución efectiva, el solo empleo de técnicas de diseño, de materiales y de procesos de construcción considerados sostenibles no trae como consecuencia un pavimento sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. National Asphalt Pavement Association (NAPA), European Asphalt Pavement Association (EAPA) (2011, February). *Production, Use, Properties, and Occupational Exposure Reduction Technologies and Trends. The asphalt paving industry. A global perspective*, 2nd ed.
2. National Asphalt Pavement Association (NAPA) (2009, September). *Black and green sustainable asphalt. Now and tomorrow*. Special report 200.
3. Epps, Jon (1994). *Synthesis of Highway Practice 198. Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*. National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C.: National Academy Press.
4. Lu, Xiaohu (2009, August). *Crumb rubber in asphalt pavements and recycling*. Sweden: Group Research, Nynas AB.
5. Asphalt Pavement Alliance (2009, October). *Perpetual Pavement Design*. Ashton, Iowa: Perpetual Pavement Open House.
6. Newcomb, D.E., Willis, R. & Timm, D.H. (2010). *Perpetual Asphalt Pavements. A Synthesis*. Asphalt Pavement Alliance IM-40.
7. <http://www.icpi.org/permeable>.
8. Kandhal, P.S. (2004, March-April). *Asphalt pavement mitigate tire/pavement noise*. Hot asphalt technology.
9. Road Directorate, Danish Road Institute (2008, June). *Use of noise reducing pavements - European experience*. Technical note 69.
10. Smith, David R. (2006). *Permeable interlocking concrete pavements - Selection, Design, construction, maintenance*, 3rd ed. Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI).
11. D'Angelo, John, Harm, Eric, Bartoszek, John, Baumgardner, Gaylon, Corrigan, Matthew, Cowsert, Jack, Harman, Thomas, Jamshidi, Mostafa, Jones, Wayne, Newcomb, Dave, Prowell, Brian, Sines, Ron & Yeaton, Bruce (2008, February). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. FHWA-PL-08-007.
12. Chappat, Michel & Bilal, Julian (2003). *The environmental road of the future. Life cycle analysis. Energy consumption and greenhouse gas emissions*. France: Colas report.
13. Wathne, Leif G. (2011, December). *Sustainability in Roadbuilding: Are We Focusing on the Right Things?* Special Report: Concrete Roadbuilding & Repair. American Concrete Pavement Association - ConcreteContractorMag.com.
14. Stripple, H. (2001). *Life Cycle Assessment of Road. A Pilot Study for Inventory Analysis*. 2nd rev. ed. (IVL, Sweden).
15. AEA, Harwell (2010, June). *Green public procurement - Road construction and traffic signs*. Technical background report. Report for the European Commission - DG Environment.
16. Miller, Timothy D. & Bahia, Hussain U. (2010, May). *Establishing a Framework for Analyzing Asphalt Pavement Sustainability*. *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 3, N.º 3.
17. Federal Highway Administration (FHWA) (2011, April). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of Practice*. Publication N.º FHWA-HRT-11-021.
18. <http://www.fhwa.dot.gov/legsregs/directives/policy/recmat-policy.htm>. *FHWA Recycled Materials Policy*, Federal Highway Administration, Wright, Jr., F. (2001). Último acceso al sitio: mayo de 2012.
19. Asphalt Pavement Alliance (2002). *Perpetual Pavements. A Synthesis*.
20. Hall, K., Dawood, D., Vanikar, S. & Tally, R. et al. (2007). *Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada*. Report: FHWA-PL-07-027.
21. Santucci, Larry (2011, September). *Long-life asphalt pavements*. Pavement Technology Update. Technology transfer program, vol. 3, N.º 2.
22. http://www.icpi.org/sites/default/files/pdfs/PICP_Comparison_Brochure.pdf Permeable Interlocking concrete pavement. A comparison guide to porous asphalt and previous concrete.
23. Gibbs, D., Iwasaki, R., Bernhard, R., Bledsoe, J., Carlson, D. & Corbisier, Ch. et al. (2005, May). International technology exchange program. *Quiet Pavement Systems in Europe*, Report FHWA-PL-05-011.
24. American Concrete Pavement Association (ACPA) (2007, October). *Green Highways. Environmentally and economically sustainable concrete pavements*. Concrete pavement research and technology. Special report.
25. Liu, Kai-Wei, Álvarez, Alex E., Martin, Amy Epps, Dossey, Terry, Smith, André & Estakhri, Cindy K. (2009, October). *Synthesis of current research on permeable friction courses: performance, design, construction, and maintenance*. FHWA/TX-10/0-5836-1. Report 0-5836-1. Texas Department of Transportation.

26. Pears, Allan (2005, June). Sustainability and roads: Capturing the ESD opportunity. *Urban Policy and Research*, vol. 23, N.º 2, 235-245.
27. Cheuk Pan Chan, Peter (2010). *Quantifying pavement sustainability for Ontario highways*. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Civil Engineering. Waterloo, Ontario, Canada.
28. Brosseau, Yves (s.f.). *Ecologiques, sécuritaires, confortables, les enrobés de demain se feront autrement: présentation des enrobés tièdes*.
29. Dorchie, T. Pierre (2008). *La route écologique du futur: Analyse de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre*. Conférence annuelle 2008 de l'Association des transports du Canada. Toronto, Ontario.
30. Brosseau, Yves, St - Jacques, Michele (2011, Mars). Le développement durable dans les chaussées urbaines: traduction en termes techniques. *Via Bitume, le revue destinée à l'industrie des chaussées souples*, vol. 6, N.º 1.

Segregaciones granulométrica y térmica en las mezclas de concreto asfáltico

Aggregate and thermal segregation in hot mix asphalt pavements

FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL

Ingeniero civil

elexdos@yahoo.com

Recibido: 10/03/2012 Aceptado: 30/04/2012

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

Resumen

La segregación de las mezclas asfálticas en caliente constituye un problema, cuyo resultado práctico es el comportamiento deficiente de muchos pavimentos. Por lo tanto, su eliminación es indispensable si se desean obtener mezclas de pavimentación de alta calidad. En los pavimentos asfálticos se identifican dos tipos de segregación: granulométrica y térmica. Este artículo se refiere a ambos y presenta un esbozo de sus causas y de los métodos conocidos para minimizar su ocurrencia. Incluye, al final, una lista de verificación donde, de manera concisa, se describen el origen de las formas usuales de segregación y las comprobaciones y ajustes posibles para corregirlas.

Palabras claves: segregación, segregación granulométrica, segregación térmica, mezcla asfáltica en caliente, planta de producción de mezcla asfáltica, camión, vehículo de transferencia, pavimentadora.

Abstract

Segregation of hot mix asphalt (HMA) pavements has been a problem that has resulted in poor performance of many pavements. Its elimination is essential to the production of high quality paving mixtures. Two types of segregation have been identified in asphalt pavements: aggregate segregation and thermal segregation. This paper deals with both of them. It provides an outline of their causes and suggests known practices that may be used to minimize its occurrence. In addition, a checklist that is attached to this paper shall be used to help the engineer in identifying segregation and taking corrective action to eliminate it when it is present in the hot mix asphalt pavements.

Keywords: segregation, aggregate segregation, thermal segregation, hot mix asphalt, asphalt plant, haul truck, shuttle buggy, paver.

INTRODUCCIÓN

La segregación granulométrica en las mezclas de concreto asfáltico es aquella a la cual se hace referencia con mayor asiduidad. Se puede definir, de manera simple, como la distribución no uniforme de los agregados grueso y fino dentro de la mezcla. Aunque la segregación puede ocurrir tanto hacia la dirección de los gruesos como hacia la de los finos, el término es empleado por el común de los ingenieros para referirse a la segregación de la fracción gruesa. Cuando ésta ocurre y la mezcla es extendida sobre la vía, se presenta concentración de partículas gruesas en unas áreas del pavimento, dando lugar a una capa con una textura áspera, falta de uniformidad superficial, permeable y con defectos de densidad que afectan adversamente el comportamiento de la estructura a corto o mediano plazo, por cuanto las áreas segregadas sufren desprendimientos progresivos por la acción del tránsito y de la humedad (figura 1), los cuales se traducen en fallas, principalmente del tipo denominado “ojo de pescado”.



Figura 1. Carpeta de concreto asfáltico segregada.

A causa de la gravedad de los problemas que genera, la prevención de la segregación granulométrica es esencial para producir capas de concreto asfáltico de buena calidad. En este artículo se resumen los aspectos fundamentales del asunto, tomando como guía algunos documentos relacionados con el tema^{1,2,3,4,5}. Los análisis y comentarios que se presentan a continuación parten de la suposición de que no existen errores en el diseño de la mezcla en el laboratorio y, en consecuencia, la

fórmula de trabajo responde a una curva granulométrica continua, conforme a las exigencias de la especificación respectiva, evitando formas que atraviesen bruscamente la línea de máxima densidad en la gráfica de potencia 0,45 de la FHWA (figura 2). El artículo 450 de las *Especificaciones generales de construcción de carreteras del Inviás* establece, por ejemplo, que “Para prevenir segregaciones (...), 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”⁶.

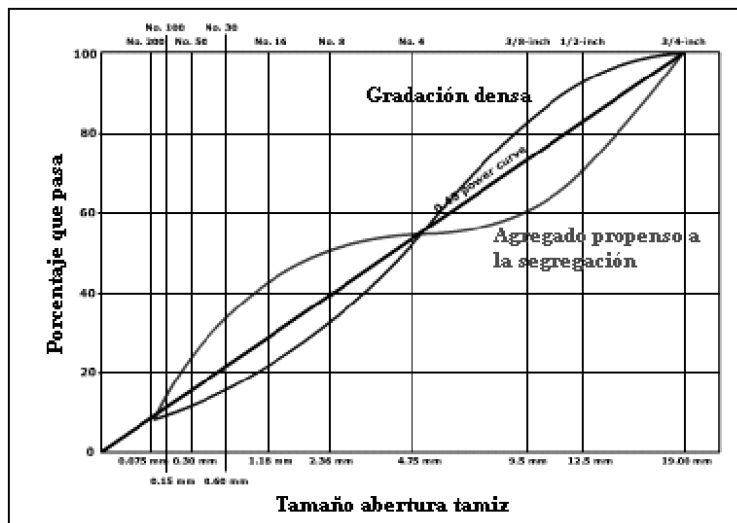


Figura 2. Curvas granulométricas en la gráfica de potencia 0,45.

1. Federal Aviation Administration (1991, October). *Hot Mix Asphalt Paving Handbook*. Advisory Circular 150/5370-14. Washington D.C.
2. James A. Scherocman (2005). *HMA Segregation: Causes & Cures*, Part 1, Part 2 & Part 3. Ohio Asphalt, Winter, Spring, Summer.
3. J. Don Brook, James J. May & Greg Renegar (1994). Segregación: causas y soluciones. *Boletín Técnico*, T-117S, Chattanooga, TN: Astec.
4. AASHTO (1997). *Segregation: Causes and Cures for Hot Mix Asphalt*. SCCA-1.
5. Australian Asphalt Pavement Association. *Asphalt Segregation*. Advisory Note 18.
6. Instituto Nacional de Vías (2002). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá, D.C.

En la actualidad se reconoce otro tipo de segregación, diferente de la granulométrica que se acaba de describir, y que puede resultar imperceptible en el momento de la construcción del pavimento. Es la *segregación térmica*, debida a diferencias de temperatura dentro del conjunto de la mezcla, en los instantes de su extensión y de su compactación. Aun si la mezcla no presenta evidencias de segregación granulométrica, la existencia de la térmica también genera debilidades en la capa asfáltica en servicio por deficiencias de compactación, las cuales pueden derivar, a corto o mediano plazo, en deterioros visibles en la superficie, similares a los producidos por la segregación granulométrica.

FORMAS DE SEGREGACIÓN GRANULOMÉTRICA

La segregación granulométrica de las mezclas de concreto asfáltico se presenta en una de tres formas (figura 3), cada una de ellas causada por un conjunto diferente de factores, los cuales se deben analizar y corregir de manera independiente:

- Segregación aleatoria
- Segregación entre viajes de mezcla
- Segregación longitudinal

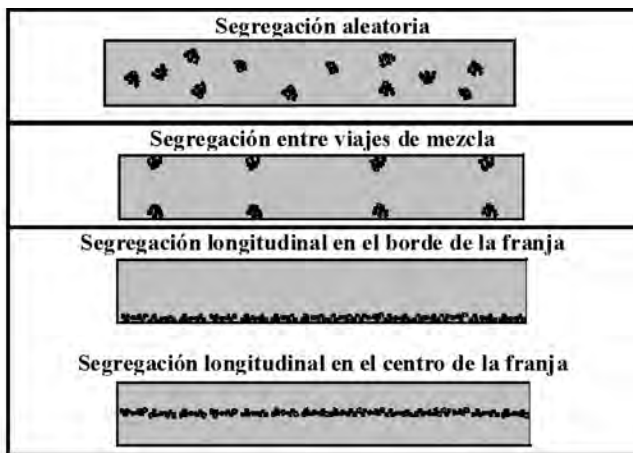


Figura 3. Formas de segregación granulométrica (ref. 5).

Segregación aleatoria

Es aquella que se presenta en la superficie pavimentada a intervalos irregulares, tanto en sentido longitudinal como transversal (figura 4), cuyo origen, casi con se-

guridad, es un manejo inadecuado de las fracciones del agregado grueso, cuando son acopiadas, alimentadas y clasificadas en la planta asfáltica.



Figura 4. Segregación aleatoria.

Cuando las bandas que transportan el agregado grueso durante el proceso de clasificación forman un acopio cónico (figura 5), las partículas de mayor tamaño y peso tienden a rodar por los lados del cono, depositándose en su parte inferior. Si el operador del cargador que va a trasladar el agregado a las tolvas en frío de la planta recoge varias cargas de la parte inferior de la pila, la granulometría definitiva de los agregados mezclados puede resultar afectada y dar lugar a una segregación aleatoria, en especial cuando la mezcla se elabora en una planta del tipo tambor secador-mezclador, donde no hay oportunidad de reclasificar los agregados en caliente.



Figura 5. Formación de una pila cónica de agregado grueso (ref. 2).

Si la planta de tambor secador-mezclador es de flujo paralelo la posibilidad de segregación es mayor, por cuanto la remezcla de agregados antes de alimentar el asfalto es limitada. Cuando la planta es de contraflujo existe una mayor oportunidad de remezcla, debido a

que el asfalto sólo se combina con los agregados en el tramo final del tambor; no obstante, la posibilidad de segregación aleatoria, aunque menor, se mantiene. Algunas plantas tienen instaladas en el extremo inferior del tambor unas láminas que hacen retroceder el agregado grueso, incorporándolo dentro del conjunto y contribuyendo a la elaboración de una mezcla de mayor uniformidad.

Las especificaciones de construcción suelen contener advertencias sobre el manejo de los acopios para evitar esta situación. Por ejemplo, en el Artículo 450 de las *Especificaciones generales de construcción de Carreteras del Inviás* se indica que “Los acopios se construirán por capas (...) y no por montones cónicos. Las cargas de material se colocarán adyacentes, tomando las medidas oportunas para evitar su segregación”⁷⁷.

El problema se puede minimizar empleando varias pilas de agregados de tamaño único en lugar de pocas con tamaños gradados, en conjunto con un sistema de alimentación en frío constituido, cuando menos, por cuatro tolvas (figura 6).



Figura 6. Sistema de alimentación en frío compuesto por seis tolvas.

Al colocar los agregados en las tolvas en frío, tienden naturalmente a formar conos, en los cuales las partículas de mayor tamaño ruedan por los lados. A medida que la tolva es vaciada se va formando un cono inverso de agregado en ella, en cuyo centro trata de caer todo el material más grueso, generando segregación. La manera de evitar que esto suceda es, simplemente, manteniendo

las tolvas tan llenas como sea posible pero sin rebosar, para evitar que el material pase de una tolva a otra.

La alimentación de los agregados en frío también puede contribuir en la segregación de las mezclas elaboradas en las plantas del tipo tambor secador-mezclador, si se produce una obstrucción en alguna tolva, pues la alimentación deja de ser uniforme (figura 7). La disposición de fondos con alivio en las tolvas en frío ayuda a asegurar la uniformidad de la alimentación (figura 8).

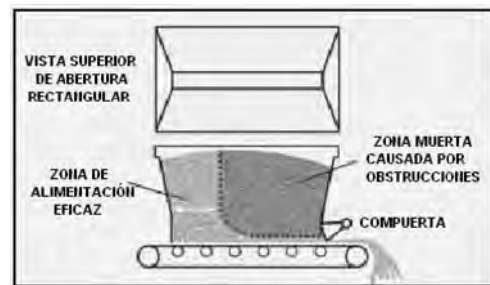


Figura 7. Tolva en frío con abertura rectangular (ref. 3).

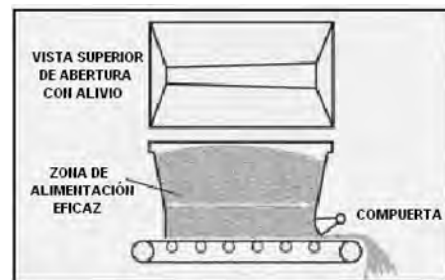


Figura 8. Tolva alimentadora en frío con alivio (ref. 3).

En las plantas de tipo discontinuo se puede generar una segregación en las tolvas en caliente que almacenan el material de menor tamaño, por la posibilidad de que el polvo mineral, proveniente del filtro de mangas o del sistema de alimentación de éste, se acumule en una de las paredes inclinadas de una tolva, permaneciendo allí hasta que la tolva esté casi vacía (figura 9). En un determinado momento esta masa de polvo se puede desprender súbitamente y alimentar la tolva de pesaje, produciendo una bachada con material ultrafino que quedará segregado y no recubierto por el asfalto.

7. *Ibíd.*

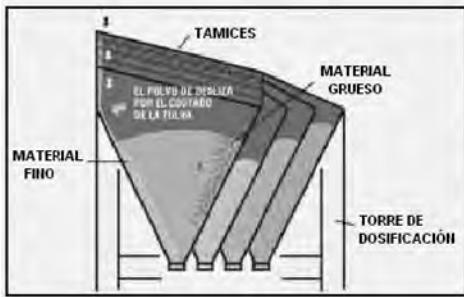


Figura 9. Acumulación de llenante mineral en una tolva caliente (ref. 3).

Si este problema se presenta, la solución más práctica consiste en instalar un deflector que haga que el llenante mineral se deslice hacia el centro de la tolva, donde se mezclará uniformemente con los materiales más gruesos contenidos en ésta (figura 10).

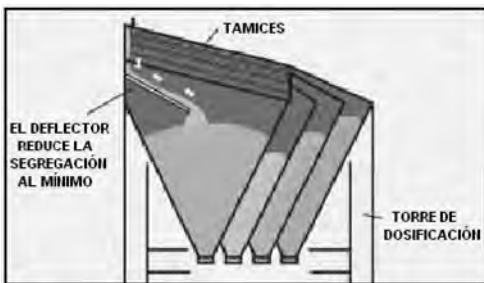


Figura 10. Tolva en caliente con deflector (ref. 3).

Cuando se produce una mezcla segregada de manera aleatoria es muy difícil, por no decir que imposible, corregirla mediante una remezcla durante el almacenamiento temporal, la carga, el transporte, la descarga o la extensión. Por lo tanto, el control de la segregación aleatoria sólo es posible con un apropiado manejo de los acopios del agregado en la planta asfáltica. Ello se logra acopiando por capas, como lo suelen indicar las especificaciones (figura 11), o si resulta inevitable la formación de pilas, haciendo que éstas sean lo suficientemente pequeñas como para que las partículas permanezcan en su lugar (figura 12). Con estos simples cuidados, la segregación aleatoria no suele constituir un problema serio en los proyectos de pavimentación.



Figura 11. Acopio del agregado en capas (ref. 3).



Figura 12. Acopio del agregado en pilas pequeñas (ref. 3).

SEGREGACIÓN ENTRE VIAJES DE MEZCLA

Esta segregación se suele manifestar en dos áreas localizadas en sentido transversal, una a cada lado del eje de la franja que se está pavimentando (figura 13). El tamaño de las áreas segregadas varía según si la pavimentadora se encuentra o no en movimiento cuando la mezcla segregada pasa bajo su plancha enrasadora, siendo mayor cuando el equipo está en movimiento. En su generación y control inciden los factores que se mencionan a continuación.



Figura 13. Segregación entre viajes de mezcla (ref. 2).

Carga de la mezcla en los camiones

Aunque suelen ser muchas las causas que se atribuyen a la segregación entre viajes, el hecho comprobado es que ésta se origina en el momento en que la mezcla es vertida al camión desde el mezclador o desde el silo

de almacenamiento de la planta. Depositar la mezcla en el camión en una sola pila (figura 14) hace que las partículas más gruesas rueden desde la cúspide hacia los bordes inferiores de la pila (figura 15). Este sistema de carga genera la segregación en la superficie de la capa extendida en dos ocasiones por viaje:

1. Al iniciar la descarga del viaje en la pavimentadora, ésta distribuye sobre la vía en primer lugar el agregado grueso que se encuentra depositado en la parte trasera del platón.
2. Al terminar la descarga, se distribuye el material grueso que ha viajado en la parte delantera del platón.

Normalmente, la segregación que se produce en el primer caso es más pronunciada, en particular si la tolva receptora de la pavimentadora se encuentra relativamente vacía, hasta el punto de que lleguen a ser visibles las barras transportadoras alimentadoras.

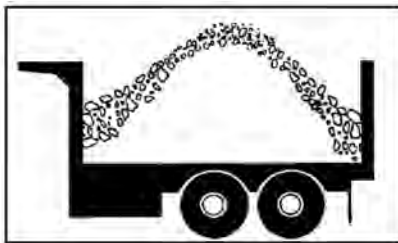


Figura 14. Carga del camión en una sola pila (ref. 2).



Figura 15. Mezcla segregada dentro del platón⁸.

8. Road Rehabilitation. Roadtec.

La prevención de este tipo de segregación es simple. Basta cargar correctamente el camión en la planta, depositando una primera bachada en un extremo frontal del platón para producir un efecto de amontonamiento contra el frente y los lados de éste, una segunda en el otro extremo (para lo cual el conductor debe desplazar el vehículo) para producir las mismas condiciones, y una tercera en la parte central, sobre los conos formados por las dos anteriores (figura 16). En un camión correctamente cargado, la mezcla deberá ocupar algo más de la mitad de la altura del platón (figura 17).



Figura 16. Carga del camión en tres etapas (ref. 2).



Figura 17. Platón de un camión correctamente cargado (ref. 2).

Cuando la carga se realiza en vehículos de gran tamaño (semirremolques, por ejemplo), las dos primeras bachadas se deberán cargar como se indicó en el párrafo anterior, colocando las siguientes (generalmente tres) progresivamente hacia el centro del platón.

Si se vierte la mezcla dentro del platón de la manera descrita se evita que al inicio y al término de la descarga de los camiones sobre la pavimentadora se acumule una gran cantidad de partículas gruesas, previniendo así este tipo de segregación.

Descarga de la mezcla en la pavimentadora

Si el procedimiento recomendado para la carga del camión en la planta no se ha utilizado, el problema se puede aliviar –aunque no eliminar– inclinando levemente el platón y manteniéndolo cerrado, de modo que se pueda dirigir la masa de la mezcla hacia la parte posterior, buscando que se produzca alguna combinación entre la parte segregada y el resto de la mezcla (figura 18). En general, se considera que la práctica de levantar el platón es buena, así el camión haya sido cargado correctamente, por cuanto ello incrementa la eficiencia en el intercambio de camiones, se acelera el proceso de la descarga en la pavimentadora y se reduce la segregación térmica. Es recomendable, además, descargar el camión en una masa rápida y de manera que inunde la tolva receptora de la pavimentadora.



Figura 18. Platón de un camión cargado y levantado (ref. 2).

Uso de vehículos de transferencia

El uso de un vehículo de transferencia de mezcla, o *shuttle buggy* (figura 19), también ayuda a controlar este tipo de segregación cuando la carga de los camiones ha sido incorrecta. Esta máquina tiene la capacidad de eliminar la segregación entre viajes y la segregación térmica (y de reducir la aleatoria), debido a que el material es perfectamente remezclado por sus sinfines antes de ser remitido a la tolva de la pavimentadora (figura 20).



Figura 19. Vehículo para la transferencia de la mezcla⁹.

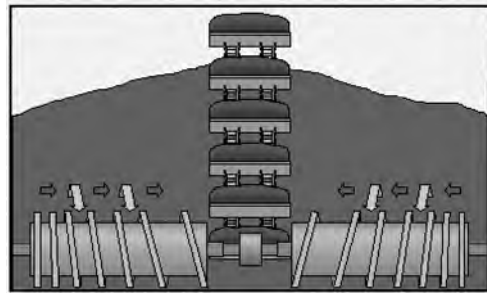


Figura 20. Sinfines mezcladores del vehículo de transferencia (ref. 3).

Condición de la tolva receptora de la pavimentadora entre los viajes de mezcla

La cantidad de mezcla que contenga la tolva receptora en el momento de la descarga del camión puede contribuir o no a la prevención de la segregación entre viajes. Si la tolva se encuentra total o parcialmente vacía entre dos viajes de mezcla (figura 21) y el nuevo viaje trae material segregado en la parte trasera del platón, la mezcla vertida al comienzo en la tolva contendrá fundamentalmente partículas de agregado grueso que, además, se encontrarán a una temperatura menor que el conjunto de la mezcla. Como la tolva está casi vacía, este material segregado será llevado por los dos transportadores alimentadores a través de las compuertas de control de flujo hacia los sinfines de distribución sin ser mezclado con el material más caliente o más fino, con el agravante de que al llegar una cantidad de mezcla escasa se reduce la fuerza en el borde de ataque de la enrasadora, lo que da como resultado una mezcla extendida, con un área de textura muy rugosa a cada lado del eje de la pavimentadora.



Figura 21. Tolva receptora casi vacía (ref. 2).

Si, por el contrario, la tolva receptora está relativamente llena (figura 22) y la volqueta trae mezcla segregada en la parte trasera del platón, existe una

9. Andy Bateman (1999). Shuttle Buggy Gets First Workout on B.C. Highway Project. *Aggregates & Roadbuilding Magazine*. Westmount, Quebec, July - August.

buena posibilidad de que al verter el contenido, el material segregado, que tiende a rodar hacia las secciones laterales de la tolva, se mezcle con la masa de mezcla que se encuentra en ella, reduciendo así la posibilidad de segregación.



Figura 22. Tolva receptora en condición apropiada para recibir un viaje (ref. 2).

Mantener la tolva receptora “medio llena” entre viajes consecutivos de mezcla hace que la cantidad de mezcla en los sinfines sea abundante y constante. Esto, a su vez, mantiene constante la fuerza en el borde de ataque de la enrasadora, lo que a su turno permite mantener constante el ángulo de ataque de ésta, favoreciendo la extensión de una carpeta lisa. Se aconseja mantener la tolva permanentemente llena, o cuando menos en un 25% de su capacidad.

Manejo de las secciones laterales de la tolva receptora

Cuando una volqueta con una mezcla segregada descarga en la tolva receptora de la pavimentadora, las partículas gruesas tienden a dirigirse hacia las secciones laterales, donde permanecen hasta que éstas son vaciadas. El vaciado de las secciones laterales de la tolva es uno de los factores determinantes en la segregación que ocurre tras la plancha enrasadora. Si la tolva está más o menos llena, la elevación de las secciones laterales empujará la mezcla, propiciando la formación de dos montones de mezcla en frente de la pavimentadora (figura 23), lo que se traducirá en pérdidas de lisura de la carpeta que se extiende, cuando la máquina pase sobre ellos.

Con el fin de vaciar las secciones laterales sin arrojar mezcla en frente de la máquina, es necesario desocupar la tolva. Ello, sin embargo, no es una buena práctica, como ya se ha indicado. Cuando las secciones laterales se levantan, las partículas gruesas que se han alojado

en ellas son enviadas al fondo de la tolva vacía y se mezclan con la mezcla segregada que cae inicialmente de la parte trasera del platón en el viaje siguiente, lo que da como resultado la inevitable extensión de una mezcla segregada.



Figura 23. Porciones de mezcla en frente de la pavimentadora (ref. 2).

Con el fin de mantener la tolva “medio llena” en todo momento, existen dos criterios en relación con el manejo de las secciones laterales de la tolva y el ingeniero deberá adoptar aquel que le brinde mejores resultados. Uno es el que recomienda levantarlas a menudo mientras la pavimentadora está en movimiento, para prevenir que la mezcla se enfríe por debajo de la temperatura adecuada de extensión. Otro, totalmente opuesto, es el que recomienda no elevar ni vaciar las secciones laterales de la tolva y sugiere, en cambio, aplicar alguno de los dos procedimientos siguientes:

1. La mezcla que al ser vaciada desde los camiones al inicio de cada jornada de trabajo fluye hacia los lados de la tolva receptora se debe mantener en dicho lugar durante toda la jornada, lo que implica que las secciones laterales no sean levantadas en ningún momento. Esta mezcla se deberá descartar al final de la jornada.
2. Un segundo procedimiento, más económico, consiste en reducir la capacidad de las esquinas de la tolva receptora fijando dos platinas, de modo que no se acumule mezcla en los bordes y, por consiguiente, no sea necesario levantar las secciones laterales para descartar material (figura 24). Cuando las platinas están en su lugar, la tolva se puede mantener “medio llena” en todo momento, lo que ayuda a reducir las posibilidades de segregación.



Figura 24. Tolva receptora con platinas (ref. 2).

SEGREGACIÓN LONGITUDINAL

La segregación de la mezcla en sentido longitudinal se puede presentar de dos maneras. Una, caracterizada por la presencia de una franja de textura muy rugosa en la carpeta, hacia el borde de la franja extendida por la máquina pavimentadora (figura 25). Este tipo de segregación se origina durante la transferencia de la mezcla recién elaborada al silo de almacenamiento, en las plantas que poseen este dispositivo. El otro tipo de segregación longitudinal es el que se presenta en el eje de la franja extendida, el cual tiene su origen en las características de la máquina pavimentadora o en algunos detalles ineficientes en su operación.



Figura 25. Segregación longitudinal de borde (ref. 2).

Segregación longitudinal en el borde de la franja extendida

La mayoría de las plantas actuales están equipadas con silos para el almacenamiento temporal de las mezclas en caliente, cuya finalidad es prevenir detenciones en la planta cuando haya interrupciones esporádicas en los trabajos de pavimentación o debido a la escasez de camiones para el transporte de la mezcla. Estos silos trabajan bien, siempre y cuando se tomen ciertas precauciones, pero pueden causar segregación de la mezcla si no se usan correctamente.

Existen diferentes tipos de silos y todos ellos pueden producir resultados satisfactorios si se operan correctamente. El diámetro y la altura de su cono inferior deben ser adecuados para prevenir efectos de cono inverso a medida que la mezcla es desalojada de la unidad.

Cuando la mezcla recién fabricada es transferida al silo de almacenamiento, normalmente es lanzada en el centro de éste (figura 26) y, aunque se trata de formar una pila cónica en la cual las partículas más gruesas tienden a rodar hacia las paredes del silo, al ser vaciado éste, el material grueso tiende a revolverse con el resto de la mezcla, no habiendo motivo para que se produzca una segregación manifiesta.

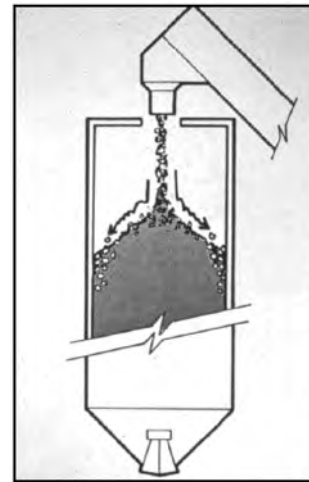


Figura 26. Alimentación del silo de almacenamiento (ref. 2).

El problema se presenta si el sistema que alimenta el silo hace que la mezcla caiga descentrada dentro de él, pues así la pila tiende a tener mayor altura en un lado, dando oportunidad para que el agregado grueso ruede y se deposite en el lado más bajo y sea descargado posteriormente a un solo lado del platón de la volqueta que transporta la mezcla a la obra. Cuando el platón vierte la mezcla en la tolva de la pavimentadora, el material grueso caerá en el mismo lado de ésta y pasará por los sinfines y bajo la enrasadora por ese lado, dando como resultado una carpeta con una franja lateral continua de gran aspereza.

Este tipo de segregación puede ocurrir aun cuando se use una tolva de retención temporal en la parte superior del silo, cuya finalidad es retener la mezcla transportada por el elevador hasta completar su capacidad y luego

descargarla de un golpe en el silo de almacenamiento. Si la mezcla recién elaborada no es descargada verticalmente en el centro de dicha tolva, las partículas gruesas de la mezcla rodarán hacia un lado de ella (figura 27) y, al vaciarla sobre el silo, dichas partículas se depositarán a un solo lado de éste; lo mismo sucederá cuando el silo sea descargado sobre el platón de la volqueta y ésta descargue en la tolva de la pavimentadora.



Figura 27. Descarga inadecuada en la tolva de retención temporal (ref. 3).

De acuerdo con el Instituto del Asfalto¹⁰, el rango ideal para operar la mayoría de los silos se encuentra entre el 25 y el 75% de su capacidad total. Los riesgos de segregación aumentan cuando están llenos por debajo del 25%, por cuanto la mezcla cae en la parte cónica inferior del silo, además de que se posibilita el enfriamiento de la mezcla

La descarga rápida por la compuerta del silo disminuye la posibilidad de segregación en los platones de las volquetas, por cuanto se reduce la acción de rodamiento de la mezcla cuando fluye hacia ellos.

Segregación longitudinal tras el eje de la pavimentadora

Los sinfines deben funcionar de manera continua, ajustando su velocidad de modo que se pueda obtener un flujo continuo y lento de mezcla. Los sinfines que funcionan a gran velocidad se deben arrancar y detener continuamente, lo cual contribuye a distribuir en forma inadecuada la mezcla en la parte central, bajo la caja de engranajes (figura 28), generando una distribución de

material grueso en el eje de la franja que se está extendiendo, lo que produce una zona continua segregada y de gran aspereza, de un ancho que oscila entre unos quince y veinte centímetros (figuras 29 y 30).



Figura 28. Sinfines y caja de engranajes¹¹.

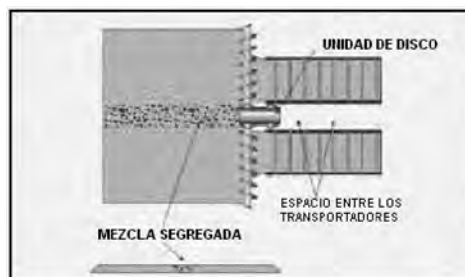


Figura 29. Segregación tras el eje de la pavimentadora (ref. 3).



Figura 30. Segregación tras el eje de la pavimentadora (ref. 11).

La instalación de deflectores de retroceso o el uso de sinfines de marcha inversa permiten empujar material homogéneo por debajo y alrededor de la caja de engranajes, con el fin de compensar la presencia de partículas gruesas que puedan causar segregación en

10. Asphalt Institute. *Eliminate Twelve Segregation Snarks*. Lexington KY.

11. http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/07_construction/07-5_body.htm.

la línea central¹² (figura 31). Como último recurso, se puede tratar de elevar el sistema de sinfines una o dos pulgadas y observar si dicha operación ayuda o no a reducir la segregación en el centro de la franja.

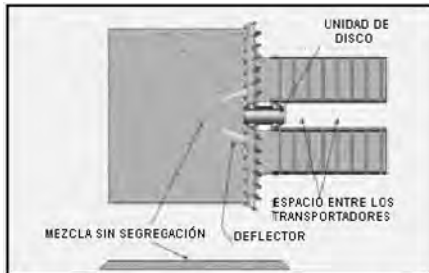


Figura 31. Pavimentadora con deflectores (ref. 3).

MANO DE OBRA

Durante la operación de extensión de la mezcla, el personal que va detrás de la terminadora con palas y rastrillos para realizar retoques menores, que ha de ser el mínimo necesario, deberá proceder con el mayor cuidado y uniformemente para evitar la segregación (figura 32). Hace más de 30 años un autor francés recomendaba que “el obrero del rastrillo no mejora jamás el perfil del pavimento; por el contrario, produce una segregación superficial importante. (...) Esta práctica del rastrillo debe proscribirse”¹³.



Figura 32. Intervención manual mínima tras la pavimentadora.

En los lugares donde resulte inevitable retocar o completar la extensión con trabajo manual, la mezcla no se debe arrojar con palas porque, procediendo de esta manera, es casi seguro que habrá segregación de las partes gruesas y finas. Lo más adecuado es formar pequeños montones de mezcla y distribuirlos uniformemente con rastrillos. De todos modos, es inevitable que la apariencia de una mezcla extendida a mano sea diferente de la que presenta cuando es extendida con máquina¹⁴.

SEGREGACIÓN TÉRMICA

La segregación térmica es el diferencial de temperatura que se produce en la mezcla asfáltica extendida en la vía, como resultado de la mayor velocidad de enfriamiento que sufre la periferia de la masa de mezcla transportada en el camión, durante el viaje hacia el sitio de las obras (figura 33).



Figura 33. Diferencias de temperatura en la mezcla transportada¹⁵.

Al depositar la mezcla en la tolva receptora de la pavimentadora, esa porción de material más frío es trasladada hacia los sinfines y queda extendida posteriormente en áreas aisladas de la vía. El fenómeno se hace más notorio cuando se deja vaciar la tolva receptora de la pavimentadora, después de cada viaje de mezcla. Al someter la capa a una compactación uniforme, es-

12. <http://www.co-asphalt.com/advantage/segregation/index.cfm>.
13. Georges Jeuffroy (1972). *Proyecto y construcción de carreteras*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.

14. Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Serie de manuales N.º 22 (MS-22). Lexington KY.
15. http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/07_construction/temperature_differentials.htm.

tas áreas aisladas con mezcla más fría presentarán una menor densidad y, consecuentemente, una mayor cantidad de vacíos con aire que el resto de la capa, debido a que el patrón de compactación se suele establecer a partir de las condiciones térmicas del conjunto de la masa, la cual se encuentra a mayor temperatura. Quienes han estudiado en detalle el problema han concluido que diferencias mayores de 15 °C entre áreas de mezcla en caliente al ser extendida, dan lugar a diferencias en el contenido de vacíos con aire de la capa compactada de cuando menos 2%, y que por cada 1% de incremento en dichos vacíos se produce una reducción aproximada de 10% en la vida del pavimento¹⁶.

En la figura siguiente se incluye una fotografía tomada con una cámara infrarroja, la cual muestra áreas de una capa recién extendida de concreto asfáltico, con temperaturas tan bajas como 67,2 °C, que se tradujeron en daños evidentes del pavimento en un término no mayor de un año, como lo muestra la fotografía de la parte derecha (figura 34).

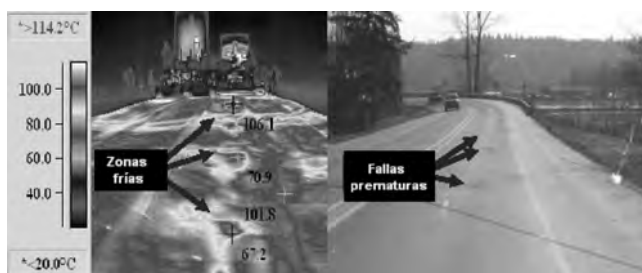


Figura 34. Correlación entre la segregación térmica y el deterioro del pavimento (ref. 16).

Aunque una medida como levantar el platón del camión con la mezcla manteniéndolo cerrado (figura 18) puede paliar la segregación térmica, el equipo que ha demostrado ser realmente efectivo en el control de este fenómeno es el vehículo de transferencia. A continuación se ilustra el resultado de una prueba realizada en España en la cual se extendieron al mismo tiempo dos franjas contiguas de mezcla, una cargando la pavi-mentadora desde los camiones de transporte y la otra

utilizando un vehículo de transferencia. Las diferencias de homogeneidad en las temperaturas de extensión de las dos franjas son evidentes (figura 35).



Figura 35. Diferencias de temperatura en franjas de mezcla extendida sin ayuda y con ayuda de un vehículo de transferencia.

A continuación se puede apreciar la uniformidad en la temperatura de una mezcla extendida y en su acabado, cuando el proceso se ha realizado con ayuda de un vehículo para la transferencia de la mezcla (figura 36).

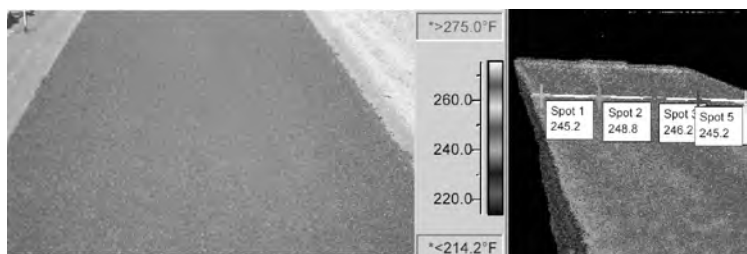


Figura 36. Aspecto y temperatura de una mezcla remezclada en un vehículo de transferencia.

EVALUACIÓN DE LA SEGREGACIÓN

Los efectos adversos de la segregación granulométrica sobre el comportamiento de los pavimentos asfálticos son reconocidos, sin excepción, por todos los ingenieros. Por ello, durante la construcción siempre se tiende a prevenirlos. Las *Especificaciones generales de construcción de carreteras del Inviás*, por ejemplo, establecen en su Artículo 450, referente a los concretos asfálticos, que “Tampoco se permitirá la segregación de la mezcla. Si ella ocurre, la extensión deberá ser suspendida inmediatamente, hasta que su causa sea determinada y corregida”. El problema radica en el hecho de que la especificación no contempla un procedimiento que permita medir la segregación granulométrica y tomar una decisión objetiva. La identificación de las áreas segregadas por defectos

16. L. Phillips, K. Willoughby & J. Mahoney (2003). Infrared Thermography Revolutionizes Hot-Mix Asphalt Paving. *Inframation*.

de granulometría se convierte, entonces, en una tarea visual y dicha naturaleza subjetiva da lugar a frecuentes faltas de consenso entre el constructor y el interventor.

La asignatura referente al establecimiento de una metodología aceptada universalmente para medir la segregación granulométrica está aún pendiente. Sólo cuando se logre, se podrá desarrollar una especificación confiable y estadísticamente viable para detectar y cuantificar el fenómeno. Por el momento, algunos ingenieros norteamericanos consideran, con base en sus experiencias, que la segregación granulométrica se produce cuando los porcentajes que pasan los tamices de 4,75 mm (# 4) o de 2,36 mm (# 8) son, cuando menos, 10% menores que los fijados al establecer la fórmula de trabajo¹⁷.

Otras investigaciones mostraron una correlación consistente entre las observaciones visuales de áreas pavimentadas con textura no uniforme y los resultados del ensayo del círculo de arena, según la norma ASTM E-965 (figura 37). El examen de los datos de áreas de pavimentos construidos con mezclas asfálticas de tipo denso, consideradas visualmente aceptables y confirmadas con el análisis de vacíos de núcleos extraídos del pavimento, indicó que al establecer un límite de profundidad de textura de 0,30 mm, el 88% de las áreas que presentaban vacíos con aire mayores de 10% en la mezcla compactada quedaba claramente identificados¹⁸. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que los valores límites de textura superficial deben ser específicos para cada clase de mezcla. Una mezcla del tipo SMA, por ejemplo, debería tener un límite de macrotextura muy superior al recién citado.

Otros investigadores han hecho intentos para distinguir entre áreas con diversos niveles de segregación, a partir del volumen de vacíos de la mezcla compactada, de su rigidez (*stiffness*), de su granulometría y de su contenido de asfalto. El procedimiento parece, por el momento, algo dispendioso como para pretender establecer con base en él un control rutinario del fenómeno.

Hace algunos años se elaboró un proyecto de norma y de especificación en formato AASHTO¹⁹, comparando los resultados de medidas de textura con la tecnología Rosan (ROad Surface ANalyzer) con la “profundidad media estimada de textura” de un área de pavimento no segregada, calculada ésta a partir del tamaño máximo del agregado pétreo y de otros parámetros granulométricos de éste. Hasta el momento, no se conoce la aprobación de dicho proyecto de norma.



Figura 37. Ensayo del círculo de arena.

En relación con la segregación térmica, si bien la mayoría de las especificaciones de construcción vial todavía no la mencionan, su valoración cuantitativa resulta más fácil y posible con el empleo de cámaras fotográficas infrarrojas. En el estado actual del conocimiento, se considera que la existencia de áreas repetidas con diferenciales de temperatura entre 10 y 15 °C indica un bajo nivel de segregación térmica; diferenciales entre 16 y 21 °C tienen características asociadas con niveles medios de segregación, y si el diferencial supera los 21 °C, se considera que el nivel de segregación es alto.

El Instituto Nacional de Vías de Colombia ha dado un paso en favor del control de la segregación térmica y del establecimiento de las responsabilidades de los contratistas, cuando se presenten en el pavimento en servicio fallas con este origen. En su parte pertinente,

17. http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/07_construction/segregation.htm.

18. Asphalt Technology News (1999, Fall). *NCAT Completes a National Study on Segregation in HMA Pavements*, vol. 11, N.º 2, Auburn University.

19. M. Stroup-Gardiner & E.R. Brown (2000). Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements - Appendix L. *NCHRP Report*, 441. Washington D.C.: Transportation Research Board.

la nueva especificación establece que “El Constructor deberá entregar al Interventor un registro fotográfico, tomado con cámara infrarroja, de las temperaturas de extensión y compactación de toda la mezcla colocada, debidamente referenciado. Estas fotografías, que serán incluidas en el Informe Final de Interventoría, servirán al Instituto Nacional de Vías como antecedente técnico si se presentan deterioros del pavimento durante el periodo de garantía, como consecuencia de la segregación térmica durante la construcción de las capas asfálticas”.

LISTA DE VERIFICACIÓN

A manera de resumen y de ayuda de memoria, se presenta una breve lista de verificación (*checklist*) en la que se indican el origen probable de los tipos de segregación citados en este artículo y algunos de los posibles ajustes destinados a corregir el problema (tabla 1).

CONCLUSIONES

1. La segregación, sea granulométrica o térmica, afecta de manera adversa la durabilidad de los pavimentos de concreto asfáltico, por cuanto genera un incremento en los vacíos con aire en las áreas segregadas, aumentando la posibilidad de daños por humedad en el pavimento. Además, las áreas segregadas son propensas a los desprendimientos y a su posterior desintegración por la acción del tránsito.
2. El mejor remedio contra la segregación es, por supuesto, evitarla. Las medidas para su prevención incluyen, en primer término, la definición apropiada de la granulometría y demás propiedades de los agregados, y el establecimiento de

una fórmula de trabajo correcta; en segundo lugar, la disponibilidad de todos los elementos necesarios para el trabajo por ejecutar, los cuales se deberán encontrar en condiciones óptimas de operación, y en tercera instancia, la disponibilidad de funcionarios debidamente capacitados para el manejo de los equipos y para realizar un control permanente y oportuno en las etapas de elaboración, transporte, colocación y compactación de la mezcla asfáltica en caliente.

3. Las causas de los diferentes tipos de segregación están más o menos identificadas, así como algunas formas de enfrentarlas, como se ha descrito en este documento y se ha resumido en la tabla 1.
4. La segregación térmica se puede determinar cuantitativamente mediante el empleo de cámaras fotográficas infrarrojas. En cambio, la valoración de la segregación granulométrica está soportada aún en criterios eminentemente subjetivos. Se espera que con los avances recientes en la tecnología y en la investigación, se cuente en poco tiempo con ensayos normalizados para su calificación y con valores límites para el rechazo de las áreas afectadas.
5. El ingeniero deberá tener siempre en mente que si es capaz de detectar la segregación de una mezcla de concreto asfáltico, también podrá tomar medidas para minimizarla o eliminarla. Por lo tanto, deberá ser muy observador y usar su intuición sin temor, para hacer todas las modificaciones que considere pertinentes en el manejo de los agregados, de las mezclas y de los equipos de fabricación, transporte y extensión de la mezcla, hasta encontrar la solución al problema que se le presente.

Tabla 1
Lista de verificación para la segregación de las mezclas de concreto asfáltico

Forma de segregación	Origen	Posibles verificaciones y ajustes
Aleatoria	<ul style="list-style-type: none"> • Gradación de diseño inapropiada. • Acopio inadecuado de los agregados. • Deficiencias en el sistema de alimentación en frío. • Acumulación de llenante mineral en una tolva en caliente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rediseñar la mezcla. • Revisar el manejo de los acopios. • Aumentar el número de tolvas en frío. • Mantener las tolvas lo más llenas que sea posible. • Disponer fondos con alivio para prevenir la obstrucción de las tolvas. • Instalar un deflector en la tolva en caliente.
Entre viajes de mezcla	<ul style="list-style-type: none"> • Deficiencias al verter la mezcla en las volquetas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar el procedimiento de carga de las volquetas. • Inclinar levemente, sin abrirlo, el platón con la mezcla. • Emplear un vehículo para la transferencia de la mezcla (<i>shuttle buggy</i>). • Mantener llena la tolva de la pavimentadora más de 25% en todo momento. • Mantener abiertas las secciones laterales de la tolva de la pavimentadora.
Longitudinal en el borde de la franja extendida	<ul style="list-style-type: none"> • Transferencia inadecuada de la mezcla desde la planta hacia el silo de almacenamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar el sistema de transporte y entrega de la mezcla en el silo. • Verificar las características del silo y su funcionamiento. • Descargar rápidamente la compuerta del silo.
Longitudinal en el centro de la franja extendida	<ul style="list-style-type: none"> • Características de operación de la pavimentadora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir la velocidad de los sinfines. • Elevar el sistema de sinfines. • Colocar placas deflectoras.
Térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Enfriamiento diferencial de la mezcla durante su transporte a la obra. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cubrir el platón durante el transporte. • Levantar el platón sin abrirlo, antes de verter la mezcla a la pavimentadora. • Emplear un vehículo para la transferencia de la mezcla (<i>shuttle buggy</i>).

Diseño de un sistema de control y supervisión de estaciones de bombeo

Design of a control and supervision system for pumping stations

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹, DIEGO ALONSO RAMOS ACOSTA²,
HENRY MORENO MOSQUERA³

1. Msc. Ing. civil. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Msc. Ing. de sistemas. Profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

3. Msc. Ing. de telecomunicaciones. Profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - diego.ramos@escuelaing.edu.co - henry.moreno@escuelaing.edu.co

Recibido: 05/05/2012 Aceptado: 15/06/2012

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

Resumen

En este artículo se presentan el diseño y la construcción de un sistema que permite analizar y programar el control y la supervisión de una estación de bombeo, así como estudiar y evaluar el comportamiento de máquinas hidráulicas. El sistema tiene la posibilidad de configurar diferentes condiciones para las máquinas, en serie o en paralelo, con la opción de que cada unidad trabaje individualmente o en conjunto, para supervisar y establecer relaciones entre variables hidráulicas (caudal, presión, potencia, eficiencia, etc.), mecánicas (velocidad y torque) y eléctricas (corriente, voltaje, potencia, THD) involucradas en una estación de bombeo. El sistema le permite al estudiante ensayar diversas estrategias de control y observar el desempeño de cada una desde diferentes puntos de vista, al igual que adquirir los conceptos para el diseño óptimo de estaciones de bombeo que funcionan en forma automática. Finalmente, el sistema está en capacidad de registrar y analizar condiciones de flujo no permanente que se generan, por ejemplo, por la puesta en marcha o apagado de las máquinas, o la manipulación de los dispositivos de control.

Palabras claves: Modbus BUS, TCP/IP, presión, velocidad, torque, supervisión.

Abstract

This paper presents the results of the design of a system allowing both the control and supervision of a pumping station. The system may be configured through different topologies either in series or in parallel, with a view to working each separately or jointly so that they can be supervised and check the existing relation among the hydraulic variables (pressure and flux), mechanical variables (speed and torque), and electrical variables (electricity, voltage, power, THD) involved in a pumping station. The system enables the student to test different control strategies observing the performance of each from different standpoints and also to learn the concepts required to obtain the best design of pumping stations working automatically.

Keywords: Modbus, TCP/IP, pressure, speed, torque, supervision.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales dificultades que se presentan en la construcción de una práctica de laboratorio con propósitos de docencia e investigación radica en el hecho de que los equipos electrónicos de control y medida, así como los dispositivos de captura de información, son costosos. Cuando el banco de pruebas se adquiere directamente en el mercado, en la mayoría de los casos el usuario final, que en este caso es el profesor o investigador, está sujeto a las modelaciones y maniobras que el fabricante ofrece.

Por esta razón, dentro de sus políticas, la Escuela Colombiana de Ingeniería busca aprovechar al máximo el conocimiento que se tiene en los diferentes centros de estudios y generar proyectos interdisciplinarios. Con el fin de aprovechar estas condiciones se presentó una propuesta de investigación que facilitó la construcción de la infraestructura adecuada para desarrollar investigación y realizar prácticas de laboratorio que permitirán que en los cursos de Hidráulica en Ingeniería Civil y en los de Automatización Industrial, Señales y Sistemas y Sistemas de Control Digital para los programas de Ingeniería Mecánica y de Electrónica, se estudien y verifiquen los principios fundamentales de la mecánica de fluidos e hidráulica, y de instrumentación electrónica y de comunicaciones industriales.

MARCO TEÓRICO

El programa de Ingeniería Civil, de acuerdo con sus centros de estudios, cuenta dentro de su infraestructura con diferentes laboratorios. Uno de ellos, el de Hidráulica, tiene varios equipos para la comprobación de teorías. Antes de este proyecto había un sistema de bombas que funcionaba con unos dispositivos básicos para la obtención de las diferentes medidas, las cuales eran analizadas en forma manual con el fin de generar las gráficas de interés en las asignaturas del área de Hidráulica, propias del programa de Ingeniería Civil.

Teniendo en cuenta que el levantamiento y la captura de los datos experimentales se hacían a mano, que la información tomada resultaba muy limitada y con eventuales errores, propios de dichas capturas, y ante la imposibilidad de implementar una aplicación de *software* que automatizara el sistema existente para generar las curvas características de las bombas y conocer y evaluar el comportamiento integral de todo el montaje,

se planteó un proyecto de investigación interdisciplinario, aprovechando el conocimiento de los principios hidráulicos y de la instrumentación electrónica, y los protocolos de comunicaciones industriales, los cuales son tema de interés de los programas de Ingeniería Electrónica y Mecánica, para proyectar un nuevo sistema de máquinas hidráulicas y desarrollar toda la infraestructura de *hardware*, de comunicaciones y de *software*, y disponer de un ambiente en el cual, a través de interfaces amigables con el usuario, sea posible tener todo el control del sistema de bombas, la captura automática de los datos que genera el banco de pruebas, la programación de su operación y comportamiento, el análisis de la información obtenida y la generación de los reportes, entre otros.

Con base en las consideraciones anteriores, se diseñó, construye y pone en funcionamiento un ambiente automatizado de trabajo, en el cual actualmente se realizan las prácticas de pregrado y posgrado para los programas de la Escuela y se plantean proyectos de investigación.

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para llevar a cabo el proyecto se identificaron y definieron los requerimientos, de acuerdo con las necesidades de las áreas del conocimiento involucradas y la importancia de utilizar el banco de pruebas para el desarrollo de futuras investigaciones.

Requerimientos hidráulicos

Fundamentalmente, el sistema hidráulico debe alimentarse con un nivel constante y la red de tuberías conectarse de tal modo que sea posible ensayar las unidades individualmente y en serie o en paralelo. El cierre de los dispositivos de control del sistema debe ser controlado, de manera que el flujo no permanente se pueda registrar en el tiempo y sea posible medir los cambios de presión en el tiempo en diferentes puntos del sistema.

Requerimientos de automatización y control

Como resultado de la identificación de necesidades en las áreas de señales y sistemas, control y automatización industrial, se establecieron los siguientes requerimientos:

- Adquisición de muestras de diferentes variables en intervalos de tiempo menores de 50 milisegundos para la identificación y control de flujo y presión en un sistema hidráulico [1].
- Adquisición simultánea de las variables hidráulicas (caudal y presión), mecánicas (par y velocidad) y eléctricas (corriente y frecuencia) para estudiar su respectiva correlación.
- Medición de la potencia hidráulica, mecánica y eléctrica para evaluar la eficiencia de las estrategias de control utilizadas.
- Posibilidad de cambiar el sistema de arranque de los motores de las bombas para comparación.



Fotografía 1. Vista general del banco de pruebas.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Sistema hidráulico

El sistema hidráulico está conformado por un tanque de nivel constante como modo de alimentación y dos bombas centrífugas conectadas mediante un sistema de tuberías, de tal manera que es posible que las unidades trabajen individualmente o sean conectadas en serie o en paralelo (figura 1 y fotografía 1). Con el propósito de realizar pruebas sobre las máquinas hidráulicas y el sistema, las tuberías tienen dispositivos de control y medida. Así, por ejemplo, se han instalado válvulas mecánicas de cheque, cierre rápido y corte, y válvulas automáticas de solenoide y reguladora de flujo. Igualmente, para la

captura de la información se han dispuesto transductores de presión, medidor de flujo y un codificador o transductor rotativo, llamado también *encoder*, para la lectura de la velocidad angular del eje de las bombas.

Sistema de instrumentación y control

La planta se diseñó e implementó tomando como referencia las actuales tendencias de la automatización y el control. Para ello, se seleccionó la instrumentación con base en un análisis de los requerimientos establecidos, teniendo en cuenta que fuera compatible con las normas actuales de comunicaciones industriales. Así mismo, se

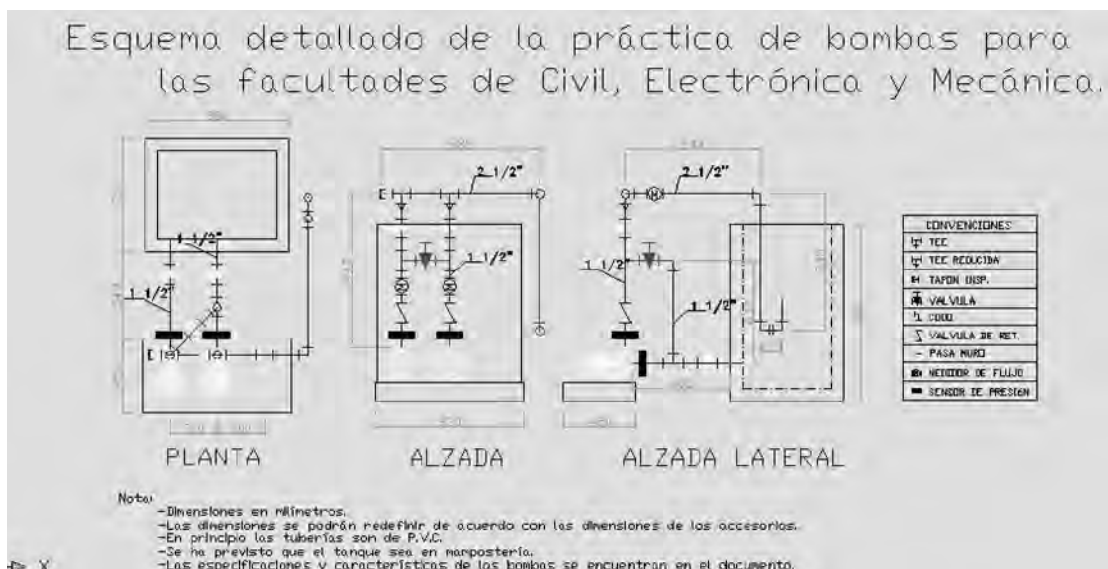


Figura 1. Esquema básico del banco de pruebas de máquinas hidráulicas.

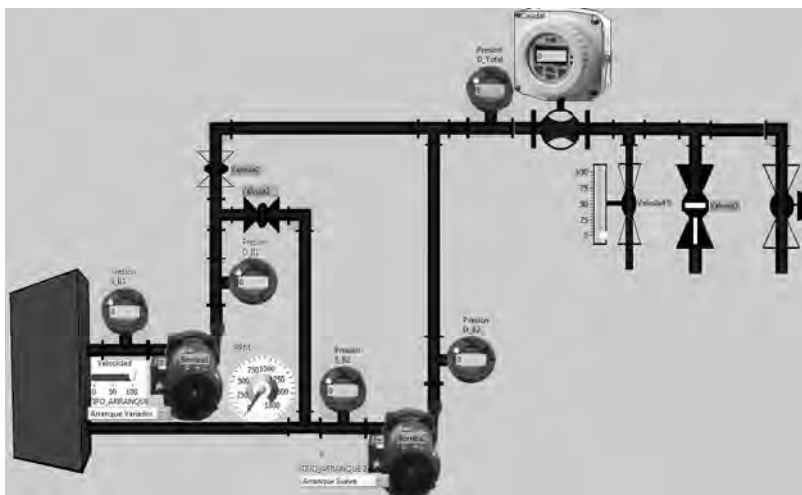


Figura 2. Ventana correspondiente a la modelación del sistema.

consideraron las características de la plataforma computacional que se implementaría como interfaz final de usuario. En la figura 2 se puede observar un diagrama del sistema aplicado en el laboratorio.

Instrumentación

Los dispositivos de control y medida, así como su ubicación, son:

- Transmisores de presión instalados en:
 - S_B1: succión de la bomba 1
 - D_B1: descarga de la bomba 1
 - S_B2: succión de la bomba 2
 - D_B2: descarga de la bomba 2
 - D_Total: descarga del sistema
- Medidor de flujo, ubicado en la descarga del sistema
- Máquinas hidráulicas y actuadores
 - Dos bombas centrífugas
 - Tres válvulas de solenoide *on-off*
 - Una válvula proporcional
- Dispositivos de control
 - Variador de velocidad del motor ATV61
 - Arrancador suave

Sistema de comunicaciones industriales

El sistema comunica el variador de velocidad y el medidor de potencia a través de una comunicación Modbus serial de 19.200 bps, y el PLC con el computador a través de una comunicación Modbus TCP/IP [2] de 1 Mbps (figura 3).

Interfaz de usuario

El sistema cuenta con una interfaz de usuario final, desarrollada totalmente bajo la plataforma de Labview 2010, que tiene las siguientes funcionalidades:

- Sistema de arranque de las bombas.
- Sistema de monitoreo de las señales generadas por los sensores [3].
- Generación de las gráficas de las variables capturadas.
- Parametrización de la planta de acuerdo con la funcionalidad que se requiera.
- Sistema de comunicaciones con el PLC de la planta a través del protocolo Modbus.

En el caso del arranque de las bombas, la interfaz permite programar los parámetros y condiciones iniciales de arranque, esto es, arranque directo, con variador, lento, rápido, etc. Desde el computador, el usuario final puede dar las opciones a través de una interfaz amigable, desarrollada simulando el ambiente real de la planta.

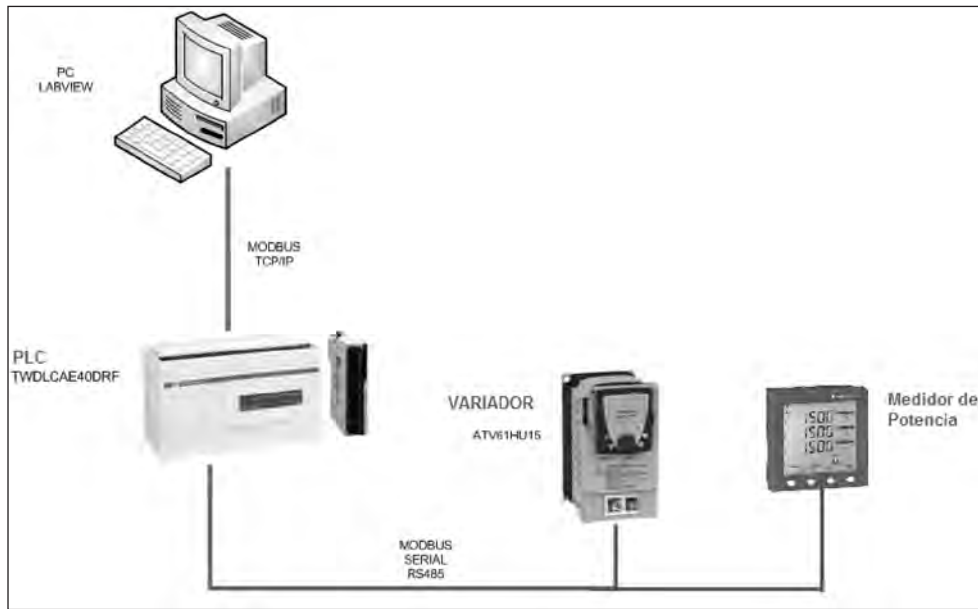


Figura 3. Sistema de comunicación empleado en el banco de prueba.

CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Hidráulica

El sistema de tuberías está diseñado para que las bombas trabajen individualmente o para que el grupo de bombas lo haga en serie o en paralelo. Adicionalmente a este procedimiento, que se realiza en forma automática, se permite que la operación de las máquinas se ejecute de manera manual o automática, de acuerdo con los requerimientos.

Una vez definida la prueba por realizar sobre la máquina, es posible establecer la velocidad de operación de ésta, la potencia eléctrica, la potencia al freno, la eficiencia, la altura dinámica total y el caudal, parámetros útiles para determinar curvas características. Igualmente, gracias a los dispositivos de control y medida, el sistema está capacitado para generar y registrar las condiciones del flujo no permanente, con lo cual es posible evaluar este tipo de flujo. En la figura 4 se presenta una ventana con el esquema general del *software* desarrollado e implementado.

Supervisión

La función de supervisión es una característica importante en este sistema. Brinda la posibilidad de monitorear en cualquier instante, de acuerdo con las condicio-

nes iniciales establecidas, el comportamiento del sistema y, de este modo, generar los reportes y las gráficas de interés de la práctica que se esté desarrollando.

Para asegurar estas condiciones se implementó la captura de información, cada 50 milisegundos, de variables que son almacenadas en diferentes posiciones de memoria del PLC para ser consultadas vía Modbus TCP/IP [2]. Las variables medidas son:

- Variables hidráulicas (presión en cinco transductores y caudal en un medidor de flujo).
- Variables eléctricas del motor (frecuencia de alimentación, voltaje de alimentación y corriente consumida).
- Variables mecánicas del motor (velocidad, par suministrado y potencia entregada).
- Variables eléctricas de la acometida (potencia aparente, potencia reactiva, potencia real, factor de potencia y THD).

En cualquier instante es posible leer una posición de memoria dada del variador y del medidor de potencia, así como cualquier otra variable que se requiera en un experimento y que no esté en la tabla de memoria del PLC, como por ejemplo la energía al comienzo y al final de un experimento.

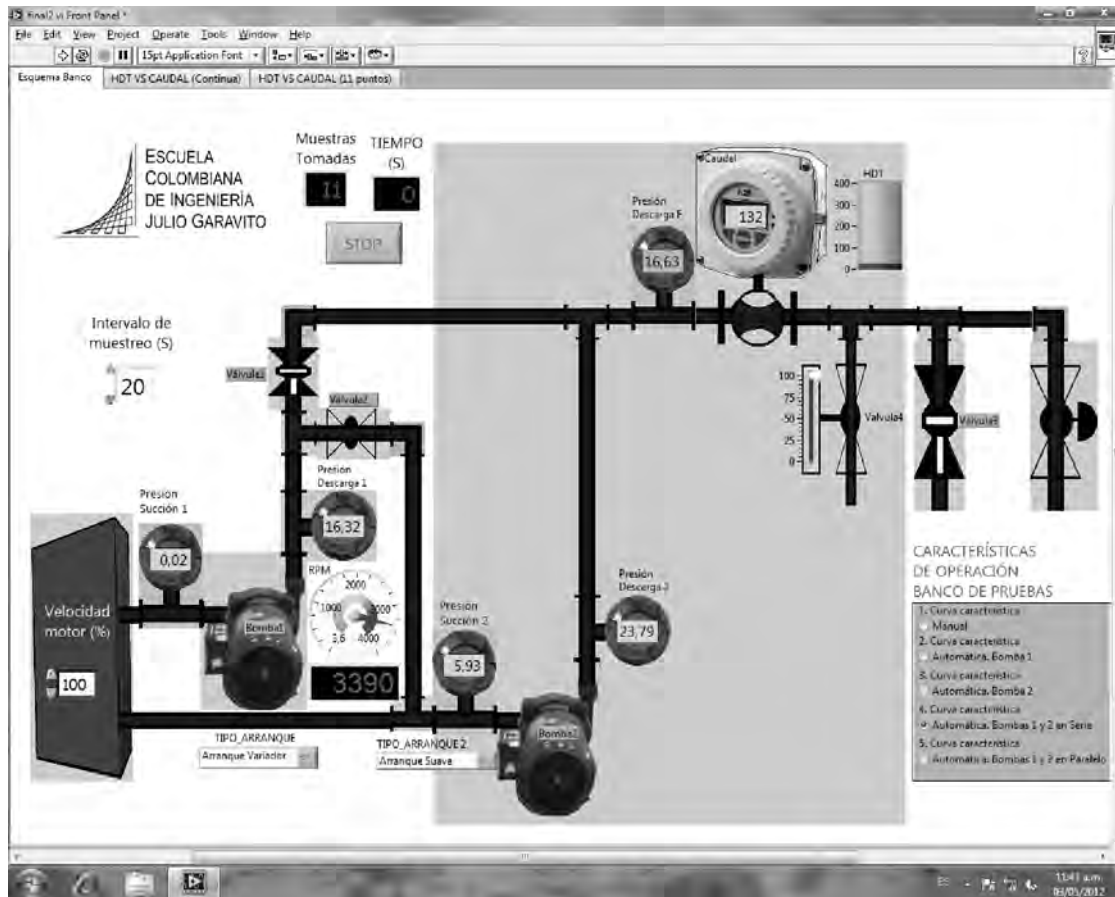


Figura 4. Ventana general con el aplicativo para el ensayo de máquinas hidráulicas.

Igualmente, en cualquier momento se puede escribir una posición de memoria del variador y modificar parámetros como los tiempos de aceleración y desaceleración.

Control

Con la infraestructura disponible es posible implementar algoritmos de control clásicos. Por tanto, se cuenta con la opción de controlar el comportamiento del sistema por los métodos tradicionales. Las siguientes opciones son posibles:

- Apertura o cierre de cualquiera de las válvulas *on-off*.
- Apertura parcial de la válvula proporcional, encendido o apagado de una máquina y variación de su velocidad de operación.

- Implementación de un control realimentado PID [5] en el sistema para observar el cambio cuando las constantes del controlador han sido modificadas (proporcional, integral y derivativa).

Así mismo, si se considera que el sistema permite modificar parámetros para otras aplicaciones futuras, con condiciones iniciales diferentes en el PLC, es posible que para proyectos nuevos se generen otras opciones de control del sistema.

Comunicaciones

Teniendo en cuenta que el banco de pruebas está interconectado con un computador a través del protocolo Modbus, es factible tener diversas opciones de transmisión de datos hacia el *software* de supervisión. Mediante un comando Modbus es posible leer, hasta cada 50 milisegundos, toda la tabla de variables pre-

viamente almacenada o parte de ella. Igualmente, se puede consultar cualquier parámetro del variador o del medidor de potencia y enviar la solicitud de cambio de los parámetros del variador.

Para futuros proyectos es posible generar nuevas aplicaciones de comunicaciones, como por ejemplo el monitoreo y control del banco de pruebas a través de una aplicación web, o mediante el uso de dispositivos móviles.

Interfaz gráfica

Por medio de las aplicaciones desarrolladas en Labview se tienen diversas opciones de monitoreo y control del banco de pruebas. Es posible consultar las tablas de variables, almacenar los datos en un archivo de texto y realizar gráficas en tiempo real.

RESULTADOS

Después de diseñar y construir el banco de pruebas para máquinas hidráulicas, ha sido posible desarrollar todas las prácticas inicialmente propuestas cuando se formuló el proyecto de investigación. Además, se han podido identificar algunas aplicaciones específicas.

Aplicaciones hidráulicas

Es posible realizar muchas aplicaciones en la parte de la mecánica de fluidos, la hidráulica y las máquinas hidráulicas. Así, por ejemplo, en la figura 4 se presenta la curva característica HDT vs. Q, obtenida directamente del banco de pruebas. Tal como se mencionó, aparte de la construcción de curvas características correspondientes al funcionamiento de las máquinas y gracias a la instrumentación y operación del sistema, es posible registrar y analizar el flujo no permanente con base en un encendido o una parada instantánea, o en diferentes tiempos de prendido y apagado de las máquinas.

Aplicaciones de control

- *Comparación de los tipos de arranque.* Esta aplicación le permite al estudiante comparar el arranque directo, con arrancador suave y variador de velocidad del motor de la bomba, determinando los factores que afectan la selección de un tipo

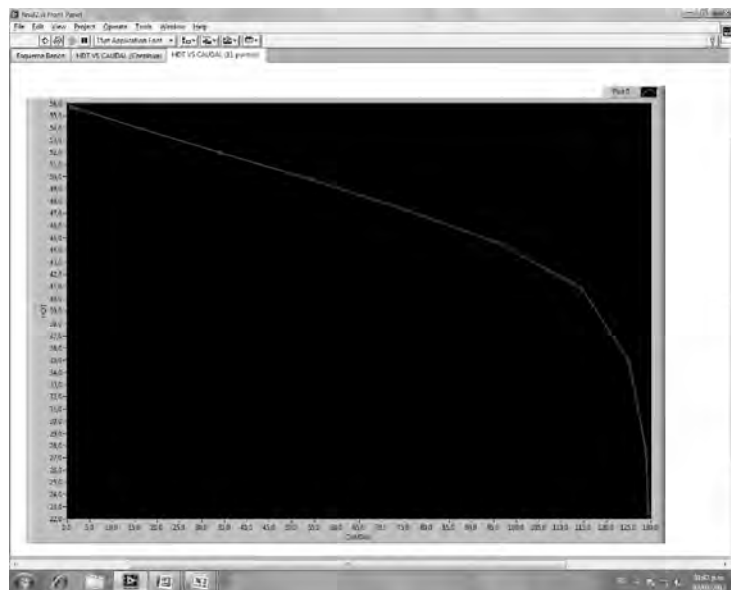


Figura 4. Curva característica por HDT vs. Q para una bomba centrífuga, construida por el aplicativo desarrollado. La curva se construye punto a punto en la medida en que avanza de manera automática la prueba.

de arranque (corriente, velocidad y factor de potencia).

- *Transitorio de encendido de la bomba.* Permite observar los cambios en las variables hidráulicas al encender y apagar repentinamente una bomba [4].
- *Transitorio de apertura de una válvula on-off.* Permite observar los cambios en las variables hidráulicas al abrir y cerrar repentinamente una válvula *on-off*.
- *Identificación del sistema.* Permite obtener la función de transferencia del sistema tomando como entrada la velocidad de la bomba o el porcentaje de apertura de la válvula proporcional, y como salida el flujo o la presión de descarga de las bombas.
- *Control del sistema.* Permite mantener constante el flujo o la presión de descarga de las bombas controlando la velocidad de la bomba o el porcentaje de apertura de la válvula proporcional, comparando la eficiencia energética y la velocidad de respuesta de las estrategias de control.
- *Transitorio del sistema realimentado ante apertura de una válvula on-off.* Permite observar los cambios en las variables hidráulicas al abrir y cerrar repentinamente una válvula *on-off*, cuando el sistema realimenta el flujo o la presión de descarga de las

bombas, y se controla la velocidad de la bomba o el porcentaje de apertura de la válvula proporcional.

CONCLUSIONES

El desarrollo y la construcción de este proyecto de investigación han permitido satisfacer adecuadamente una serie de necesidades de aplicación de conocimiento que supuestamente debían atenderse mediante herramientas disponibles en el mercado. Además, se ha instalado un sistema muy versátil en el que es posible desarrollar investigación en la mecánica de fluidos e hidráulica a presión, en especial sobre el análisis y comportamiento del flujo no permanente.

Utilizando la instrumentación electrónica disponible en el mercado y los dispositivos y protocolos para transmisión y manejo de información, los estudiantes conocerán y analizarán en tiempo real el comportamiento de las máquinas hidráulicas acopladas a un sistema hidráulico, de acuerdo con diferentes requerimientos. La posibilidad de que el motor suministre a la máquina hidráulica energía variable amplía considerablemente las facilidades de análisis, tanto de la máquina como del sistema al que se acopla.

El sistema les permite a los estudiantes no sólo aprender a diseñar controladores sino también a implementarlos en el control de variables reales (flujo y presión), así como observar los resultados de cada estrategia en términos de eficiencia energética y de tiempo de respuesta en una forma amigable.

La estructura propuesta para el sistema permite estudiar adecuadamente los fenómenos transitorios que se presentan tanto en la parte hidráulica (flujo y presión), como en la mecánica (par y velocidad) y en la eléctrica (corriente y voltaje), en una estación de bombeo al encender repentinamente una bomba, abrir o cerrar una válvula.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Travis, Jeffrey (2002). *Labview for Everyone. National Instruments*, 2nd ed., pp. 304-308.
- [2] Qing, Liu & Yingmei, Li (2006, October). *Modbus TCP/IP based Network Control System for Water Process in the Firepower Plant*. IEEE Press.
- [3] Joelianto, E. & Hosana (2008, June). *Performance of an industrial data communications protocol on Ethernet network*. IEEE press.
- [4] Gaikwad, A.J. (2003, October). *Transient analysis following tripping of a primary circulating pump 500 MWe PHWR power plant*. IEEE press.
- [5] Kuo, Benjamin (2002). *Sistemas de control automático*, 7.^a ed. Editorial Pearson, pp. 708-743.

Actuadores de efecto Peltier de semiconductores: “La nevera del futuro”

Actuators with Peltier effect of semiconductors: “The refrigerator of the future”

JUAN MANUEL ANDRADE MORALES

Bioeci

Recibido: 20/05/2012 Aceptado: 20/06/2012

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

Resumen

En este momento histórico los procesos de refrigeración se hacen comprimiendo y descomprimiendo gases (todos ellos con posibilidad de causar cáncer en animales y seres humanos).

Existe una esperanza de cambiar todos estos gases refrigerantes por dispositivos inocuos de estado sólido (actualmente van liderando la competencia las moléculas de telurio-bismuto y las moléculas de selenio-antimonio).

Si se logra mover un chorro de electrones desde orbitas atómicas inferiores (niveles de valencia) hasta las órbitas de conducción, los electrones deben ganar energía, por lo tanto, toman la energía del medio (absorben el calor del medio ambiente), produciendo de esta manera frío. El milagro de este movimiento de electrones se logra gracias a los materiales semiconductores tipo P y tipo N y a una fuente de voltaje DC; claro está, que para poder cerrar el circuito se debe volver a bajar los electrones de la banda de conducción a la banda de valencia y esto se hace cediendo calor al medio. Es decir, si se logra producir frío en un lugar de un dispositivo, también se logra producir calor en otro lugar del mismo y hasta el momento esto no se puede evitar.

Lo anterior genera que el punto clave en las investigaciones de hoy en día, sobre este tema, está en el diseño de moléculas tipo P y tipo N que sean buenas conductoras de electrones pero malas conductoras del calor.

Palabras claves: nevera de semiconductores, efecto Peltier, banda de Valencia, banda de conducción, enlace covalente.

Abstract

Refrigeration processes to this day consist of compression and decompression of gases (which can be carcinogenic for both humans and animals).

There is work in progress to replace these refrigerating gases by devices in solid state, which are expected to be harmless. At present, there are two leading options: bismuth telluride molecules and selenium-antimony molecules.

If an electron beam is promoted from lower-energy bands (valence orbitals) to conduction bands, such electrons should gain energy, that is they take energy from the environment (they absorb heat), thus producing cooling effects. The miracle of this electron promotion is obtained thanks to p-type and n-type semiconductor materials and a DC voltage source. Naturally, to close the circuit the electrons must be lowered again from the conduction band to the valence band and this is achieved by releasing heat into the environment. That is, if cooling effects can be produced in one place of this device, then heat is also being produced in another place of the same device, and this has been so far impossible to avoid.

For this reason, the design of P-type and N-type molecules that can be good electron conductors but bad heat conductors is a key issue in today's research on this topic.

Keywords: semiconductor refrigerators, Peltier effect, valence band, conduction band, covalent link.

El efecto Peltier es una propiedad termoeléctrica, de materiales sólidos, descubierta en 1834 por Jean Peltier, que después del desarrollo científico en electrónica de semiconductores se puede redefinir así: “Capacidad de generar diferencias de temperatura a partir del movimiento de electrones, cuando estos últimos cambian de banda energética”.

Las bandas energéticas protagonistas son la *banda de conducción* y la *banda de valencia*. Los electrones que estén ubicados en estas bandas tienen más energía que los que giran en el resto de órbitas saturadas alrededor de sus núcleos.

La *banda de conducción* es la más alejada de los núcleos atómicos, por lo que el electrón que fluya por esta banda tiene la máxima energía y está prácticamente libre, razón por la cual puede ser arrastrado con facilidad por cualquier campo eléctrico o magnético. Un material que tenga muchos electrones libres en la *banda de conducción* (puestos ahí artificial o naturalmente) es un buen conductor de electricidad.

La *banda de valencia* ocupa el segundo lugar en energía, esta se encuentra ocupada por todos los enlaces covalentes de los materiales en estado sólido y puede facilitar la conducción de electrones, en la medida en que tenga muchos enlaces covalentes incompletos (“huecos”). Los electrones, en presencia de un campo eléctrico o magnético, se moverían de “huevo en huevo”.

Se puede intuir fácilmente que cuando fluyen electrones de la *banda de conducción* a la *banda de valencia* se produce calor (los electrones tienen que ceder energía para poder bajar de nivel energético) y en forma inversa, cuando fluyen electrones de la *banda de valencia* a la *banda de conducción* se genera frío (los electrones absorben calor del medio para poder subir de nivel energético). Es preciso mencionar que para poder mover los electrones se requiere una batería externa (voltaje continuo, VDC). La batería “empuja” los electrones pero no sabe por cuál “banda” van a transitar. La magia de producir frío y calor la debe hacer el ingeniero colocando alternadamente, en el camino de los electrones, unos materiales llamados *P* y otros llamados *N*.

Para obligar a los electrones a estar circulando por la banda de conducción se disponen materiales *N*, y para obligarlos a moverse por banda de valencia se requieren semiconductores tipo *P*. Los materiales tipo *N* son ricos en electrones posicionados en la banda de conducción y los semiconductores tipo *P* tienen abundancia en enlaces covalentes incompletos, posicionados en la banda de valencia (figura 1).

El diseño de materiales tipo *N* y tipo *P* se logró gracias a los avances en físico-química, con base en el modelo atómico de Bohr, donde los electrones giran en niveles energéticos diferentes alrededor del núcleo, que se encuentra constituido mayori-

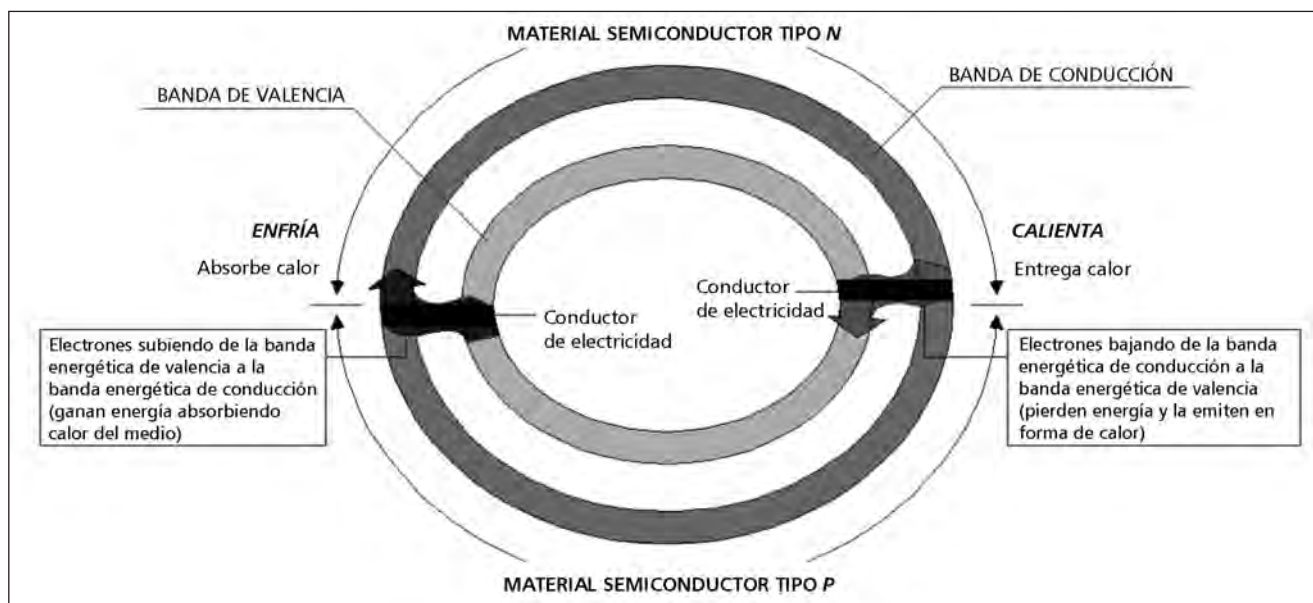


Figura 1. Moviendo los electrones de la banda de conducción a la banda de valencia para producir calor y moviendo los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción para producir frío.

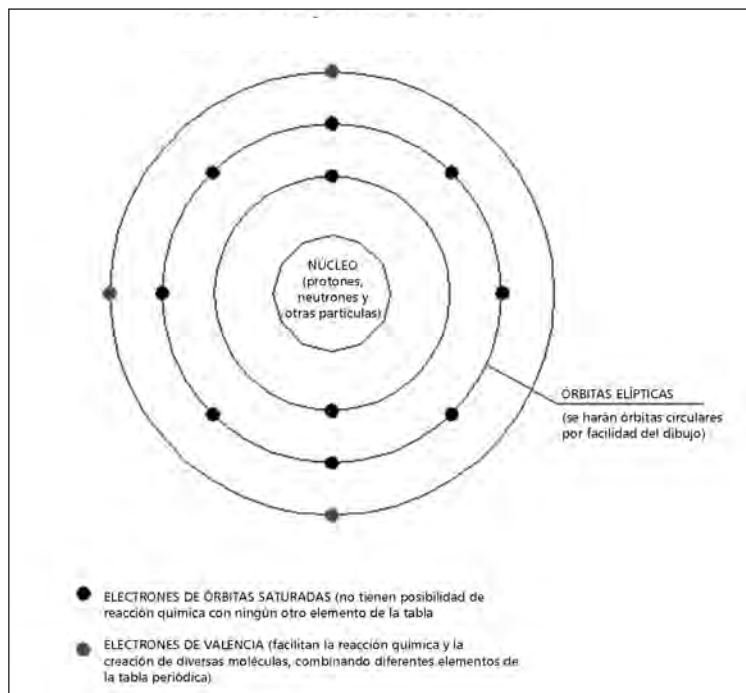


Figura 2. Modelo atómico de Bohr.

tariamente por protones, neutrones, leptones y hadrones (figura 2).

Como se explicó anteriormente, el diseño de actuadores de EP (figura 1) parte del hecho de obligar a los electrones a moverse por la banda de conducción hacia la banda de valencia, para producir calor y posteriormente obligarlos a pasar de la banda de valencia hacia la banda de conducción para producir frío. Para poder llevar a cabo este proceso se requiere el diseño de moléculas con muchos electrones libres en la banda de conducción (recordar que la banda de conducción está más alejada de los núcleos de los átomos que la banda de valencia y, por lo tanto, tiene más energía). A este tipo de materiales se les conoce como tipo *N*.

Además del diseño de moléculas que faciliten la conducción de corriente eléctrica a través del nivel energético de valencia, se debe lograr un material rico en enlaces covalentes incompletos. Este tipo de material se conoce como material tipo *P*.

Es preciso explicar que un enlace covalente incompleto tiene la tendencia natural a completarse, por lo que atraerá siempre a un electrón. Si se energiza con una fuente de corriente continua un trozo de material constituido por dichas moléculas, la corriente de electrones fluirá por la banda de valencia, ya que los

electrones inevitablemente serán atraídos por los enlaces covalente incompletos (“huecos”).

DISEÑO DE MATERIALES TIPO *N*

Un material tipo *N*, para circuitos electrónicos, se diseña con materiales del grupo IV de la tabla periódica (carbono, silicio, germanio, estaño, plomo, ununquadio) o con las moléculas de arseniuro de galio; con todo, el silicio es hoy el material preferido debido a su bajo costo y la facilidad de explotación. Este material hay que doparlo con materiales del grupo V de la tabla periódica (nitrógeno, fósforo, arsénico, antimonio, bismuto y ununpentio), siendo el arsénico y el fósforo los preferidos para fabricar materiales tipo *N* en circuitos electrónicos analógicos y digitales (microprocesadores - computadores). Para actuadores de “efecto Peltier”, los materiales tipo *N* han tenido que diseñarse con materiales de baja conductividad de calor y las investigaciones han llevado a crear moléculas de bismuto-teluro o selenio-antimonio.

El bismuto es un material del grupo V pero su último nivel está conformado por dos electrones en la subcapa “s” y tres electrones en la subcapa “p”. Por lo tanto, este material puede combinarse con materiales del grupo IV para formar materiales tipo *P* (tomando sólo tres electrones del último subnivel), o construir materiales tipo *N* (usando los cinco electrones del último nivel), como se explicará más adelante.

Para lo anterior se debe tener en cuenta la diferencia entre nivel y subnivel o subcapa energética.

El teluro es un metaloide del grupo VI, pero en su último nivel energético tiene dos electrones en la subcapa “s” y cuatro electrones en la subcapa “p”; puede trabajar químicamente como material del grupo IV. Por esto, a una adecuada temperatura es posible fabricar artificialmente un sólido con muchos electrones libres en la banda de conducción mezclándolo con bismuto (tomar el bismuto con sus cinco electrones en el último nivel energético). La explicación para selenio-antimonio es igual.

Con el ánimo de entender fácilmente el proceso de “construcción” artificial de un material tipo *N*, se presenta como ejemplo en la figura 3 la molécula silicio - fósforo. El silicio puro tiende a crear cuatro (4) enlaces covalentes y al doparlo con un material del grupo V, como el fósforo, se volverán a crear cuatro

enlaces covalentes y siempre quedará un electrón libre en la banda de conducción.

La reacción química entre átomos de los grupos IV y V tendrá, inexorablemente, un electrón libre para cada átomo del grupo V que se logre ubicar dentro de cuatro átomos del grupo IV (figura 3).

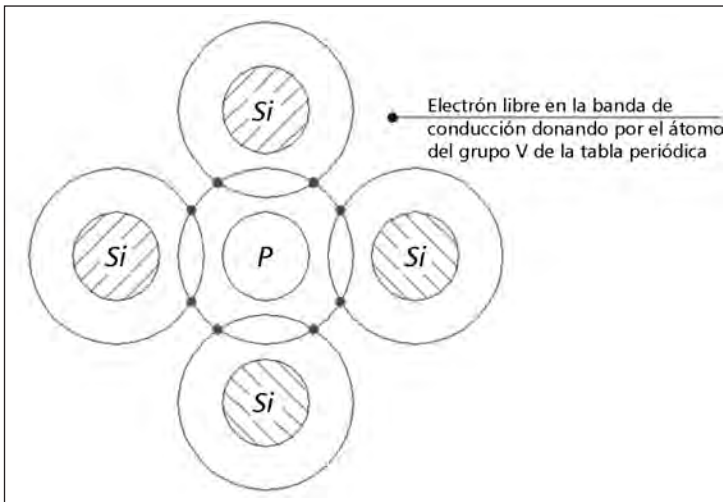


Figura 3. Diseño de materiales tipo *N* fusionando materiales del grupo IV con materiales del grupo V de la tabla periódica.

Si se hace un resumen de la situación de un material tipo *N* constituido por billones de átomos, se tendrán a nivel global billones de electrones en la banda de conducción y unos pocos enlaces covalentes incompletos, creados por calor o luz, en la banda de valencia (figura 4).

DISEÑO DE MATERIALES TIPO *P*

Un material tipo *P* clásico, para usarlo en circuitos integrados de electrónica digital y analógica, se construye con base en silicio y un material del grupo III, como boro, aluminio, galio, indio, talio y ununtrio, siendo el boro, el aluminio y el galio los preferidos para la construcción de materiales *P* (figura 5). Esta reflexión es sencilla: los materiales del grupo IV tenderán a formar cuatro enlaces covalentes, pero como son mezclados con materiales del grupo III, siempre habrá un enlace covalente incompleto por cada átomo del grupo III que se logre fundir con el material del grupo IV. Con el ánimo de explicar con facilidad la “construcción” de un material tipo *P*, más adelante se muestra una molécula con base en silicio y aluminio (figura 5).

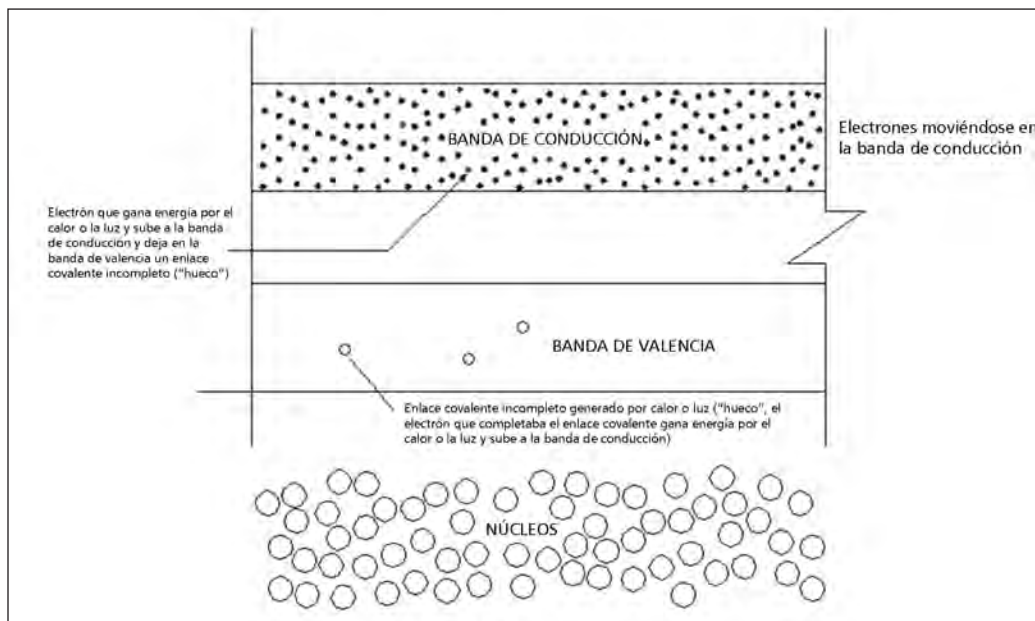


Figura 4. Estructura de las bandas de energía en los materiales tipo *N*.

Nota: Todas las investigaciones tendientes a diseñar nuevos materiales tipo *N* pueden hacerse con átomos disímiles, pero el diseñador tendrá que cumplir con un objetivo fundamental: se tienen que dejar las moléculas de tal manera que existan billones de electrones libres en la banda de conducción.

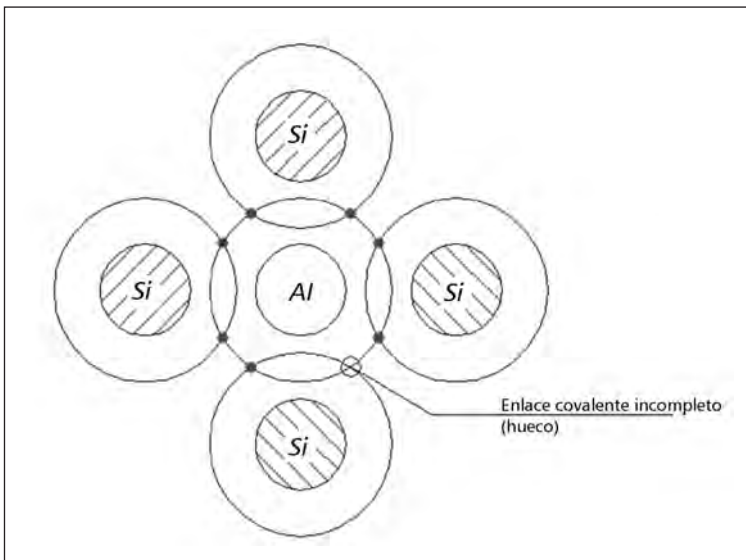


Figura 5. Estructura atómica de un material tipo *P* combinando un material del grupo IV con un material del grupo III de la tabla periódica.

En el caso de actuadores de "efecto Peltier", actualmente se hace investigación buscando un material que tenga posibilidades de formar moléculas tipo *P*,

pero que sea mal conductor del calor. Esta búsqueda ha arrojado, hasta el momento, el uso de una molécula con dichas propiedades, construida alternando capas delgadas de bismuto-teluro o antimonio-teluro.

En consecuencia, se tendrá un material con billones de enlaces covalentes incompletos en la banda de valencia y unos pocos electrones que suben a la banda de conducción, gracias a enlaces covalentes rotos por calor o luz (figura 6).

En la figura 7 se puede observar el diseño ingenioso de un actuador de "efecto Peltier", alternando la conducción de electrones de materiales tipo *P* con materiales tipo *N*, absorbiendo calor del medio y, por lo tanto, produciendo de esta manera frío, ya que los electrones pasan de la banda de valencia a la banda de conducción. Posteriormente, la conducción de electrones se hace desde materiales tipo *N* hasta materiales tipo *P*, pasando los electrones de la banda de conducción a la banda de valencia, produciendo así calor. El movimiento de los electrones a través del actuador de EP es impulsado por una batería externa con voltaje DC.

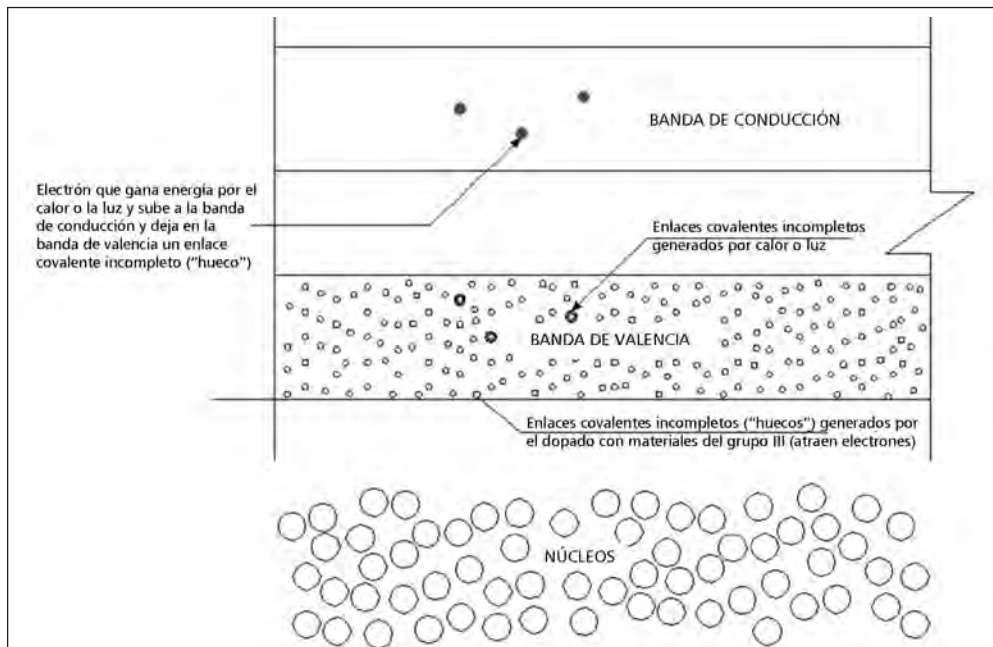


Figura 6. Estructura de las bandas de energía en un material tipo *P* (la gran cantidad de enlaces covalentes incompletos en la banda de valencia facilita el paso de electrones).

Nota: Todas las investigaciones tendientes a diseñar nuevos materiales tipo *P* pueden hacerse con átomos disímiles, pero el diseñador tendrá que cumplir con un objetivo fundamental: se tienen que dejar las moléculas de tal manera que existan billones de enlaces covalentes incompletos en la banda de valencia.

Si se invierte la polaridad de la batería en el actuador de EP, en la placa donde se producía calor ahora se producirá frío. Se puede hacer un análisis inverso para llegar fácilmente a esta conclusión.

Generalmente, la unión de materiales tipo *P* con materiales tipo *N* se hace con placas de cobre, ya que éste es un buen conductor de la electricidad (resistencia casi igual a cero). Encima de las placas de cobre, para producir un aislamiento eléctrico, todos los actuadores de EP llevan un recubrimiento de cerámica; de esta manera, las celdas quedan aisladas eléctricamente para ser usadas en cualquier dispositivo que la imaginación pueda crear.

Hoy en día, algunas de las aplicaciones de actuadores de EP son las que se presentan a continuación:

- En la industria automovilística se puede encontrar, en medio del piloto y el copiloto, una nevera - calentador que por un lado enfría y por el otro calienta. El conductor puede enfriar su gaseosa o calentar su tinto en una pequeña área (0,008 m³).
- Innovaciones en automóviles de alta gama presentan hoy en día el aprovechamiento del calor generado en el motor de explosión al quemar gasolina. Ese calor se puede usar para generar energía eléctrica mediante el efecto Seebeck, que

es un fenómeno “inverso” al “efecto Peltier”. Si se les entrega a dos materiales *P* y *N* una diferencia de temperatura, ellos regalan energía eléctrica, y si se les inyecta energía eléctrica a materiales *P* y *N*, regalan diferencias de temperatura (“efecto Peltier”). Esto representa, en los automóviles modernos, un generador de energía eléctrica que puede contribuir hasta con el 10% de la energía consumida por el automóvil. La contribución de este generador termoelectrico ayuda a consolidar el automóvil híbrido (electricidad - gasolina).

Hay que seguir investigando, pues quedan muchos materiales por descubrir o crear. La nevera de bismuto-teluro o selenio-antimonio tiene un problema: el calor invade al frío, y se requiere un ventilador para evacuar el calor. Si el ventilador falla, la nevera se funde; de modo que hay que encontrar nuevos materiales *P* y *N* con elementos químicos que den por resultado buenos conductores de electrones, pero “malos conductores del calor”. La persona que los encuentre librerá a la humanidad de muchos refrigerantes cancerígenos y de otros refrigerantes que dañan la capa de ozono; será el hombre más satisfecho sobre la tierra, porque generará miles de empleos y le quedarán unos buenos billones de dólares obtenidos científicamente... Ojalá sea un colombiano.

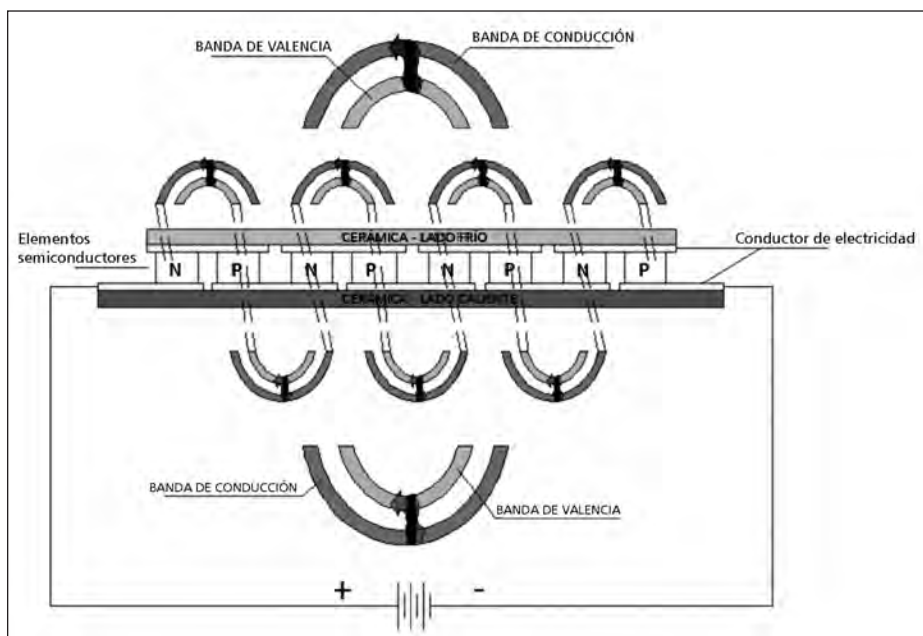


Figura 7. Construcción de un actuador de “efecto Peltier” alternando cuatro materiales tipo *P* y tipo *N*.

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

Experimental evaluation of the flexural stiffness of sandwich panels made of polyurethane rigid foam and steel sheets facings 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 flexión de probetas tomadas de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. En un primer artículo se presentaron los resultados de ensayos a carga axial de probetas similares. Dichas propiedades son necesarias para efectuar un análisis estructural por elementos finitos de un modelo de viviendas para atender emergencias, como parte del proceso de homologación del sistema ante la Comisión Asesora Permanente del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

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

Abstract

This paper presents the results of testing sandwich panel specimens of high density polyurethane foam with metallic facings subjected to flexural loads. The results of axial testing of such panels were presented in a first article. The purpose was to determine their mechanical properties in order to analyze by finite elements a design for emergency shelter. This is part of the process to get approval for the design by 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 cerramientos exteriores, como tejas o como 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 de ese tipo 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.

La vivienda propuesta es de un piso y tiene 36,48 m² de área construida. Su configuración en planta se muestra en la figura 1.

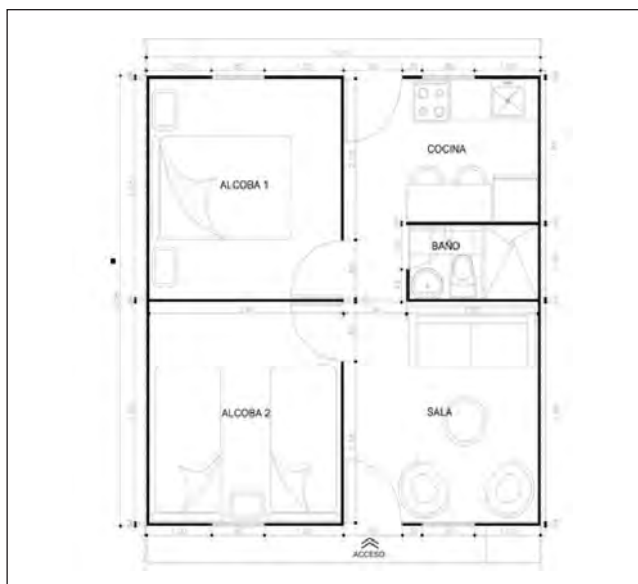


Figura 1 Configuración en planta de la vivienda propuesta.

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 se pudieran utilizar 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.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Estudio de las viviendas propuestas.

Como se indicó en la primera parte de este estudio, ref. 6, por tratarse de un país tropical y para la clase de uso que se les va a dar se considera que no se justifica considerar efectos térmicos ni de flujo plástico.

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 solicitaciones de fuerza axial, de flexión y de corte.

Metodologías de análisis

Por las características del sistema propuesto y por tratarse de un material compuesto, heterogéneo y anisotrópico, se decidió utilizar dos metodologías aproximadas para el análisis, a saber: 1) por elementos finitos y 2) planteamiento interactivo con la suma de las diversas

solicitaciones. En este artículo se presenta parte de los estudios previos para poder aplicar el primero de ellos.

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

Análisis por elementos finitos

Se utilizará el programa SAP 2000, versión 14.2.0, ref. 7, suponiendo que el material tiene propiedades ortotrópicas y que los paneles están unidos con conectores simples cada determinado intervalo.

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

- 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 1.
- σ_y = es la desviación estándar de y .

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

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 un artículo anterior, ref. 6, se presentaron 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. En este artículo se muestran los resultados de ensayos a flexión de probetas pequeñas con nervaduras tanto en el sentido de la luz como perpendicular a él.

Ensayos a flexión de probetas pequeñas

Para los ensayos a flexión se siguieron los procedimientos estipulados en la norma ASTM D7250/D7250M-06: “Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness”, ref. 8, y en la norma europea EN 14509-06 A.3: “Ensayo de resistencia al esfuerzo cortante sobre material del núcleo”, ref. 9.

Se probaron dos series de probetas: la primera en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería y la segunda en las instalaciones de Metecno en su planta de Santander de Quilichao.

Tabla 1
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

Ensayos a flexión realizados en la Escuela Colombiana de Ingeniería

Especímenes de 225 mm de ancho por 450 mm de longitud se sometieron a flexión en sentido paralelo y perpendicular a la nervadura. Siendo un material compuesto, se consideró importante averiguar experimentalmente las rigideces a flexión y a corte, por lo cual se emplearon dos configuraciones de carga para poder plantear dos ecuaciones simultáneas. La primera de ellas fue aplicando cargas concentradas iguales en los cuartos de la luz y la segunda haciendo lo mismo pero con cargas en los tercios de la luz.

Las probetas con las nervaduras en el sentido de la luz se denominaron FAC y FAT para las cargas aplicadas en los cuartos y en los tercios de la luz, respectivamente. Análogamente, para la flexión con nervaduras perpendiculares al sentido de la luz, se clasificaron en FBC y FBT para cargas en los cuartos y en los tercios de la luz.

En las zonas de aplicación de carga y en los apoyos se empleó neopreno para evitar el aplastamiento en dichas zonas. Además, en cada ensayo se utilizaron los mismos elementos en el montaje y se numeraron de forma tal que se garantizara su adecuada disposición antes de iniciar los ensayos. Dicho montaje generó una precarga de 60 N para todas las probetas.

La carga se aplicó con una máquina ELE Multiplex E-50, de 10 kN de capacidad, a una velocidad constante de 4 mm/min para las probetas FA y de 2 mm/min para las FB. Se emplearon anillos de carga de 10 kN y de 4,5 kN en uno y otro caso.

La instrumentación de las muestras se realizó empleando dispositivos electrónicos y mecánicos como se muestra en la figura 2. En ambos extremos de las muestras, en el centro de la luz, se colocaron transductores lineales (LVDT) y comparadores de carátula para medir las deflexiones de la probeta. En los extremos se registró el movimiento de la mesa usando transductores lineales en los apoyos.

Ensayos de flexión con nervaduras en el sentido de la luz

Para los ensayos de flexión con nervaduras en el sentido de la luz se obtuvieron las curvas Carga vs. deflexión para cargas aplicadas en los tercios (figura 3 a)) y en los cuartos de la luz (figura 3 b)). Se emplearon los valores promedio de las deflexiones medidas con los LVDT en el centro de la luz. En todos los casos las curvas se ajustaron a cero.

Las fallas típicas obtenidas para las probetas FA se presentan en la figura 4. Las fallas se desarrollaron en las zonas de aplicación de la carga, donde se presentaron la falla del poliuretano por corte y el desprendimiento de la lámina inferior que se extendió hacia los apoyos.

En la figura 5 se muestran el montaje utilizado para ensayar la probeta FAT-2 y el estado final de dicha probeta al alcanzar la carga máxima. En este caso no hubo falla en el poliuretano ni desprendimiento de la lámina; se presentó pandeo local en la lámina a compresión, causado quizás por tener una mayor concentración de la carga.

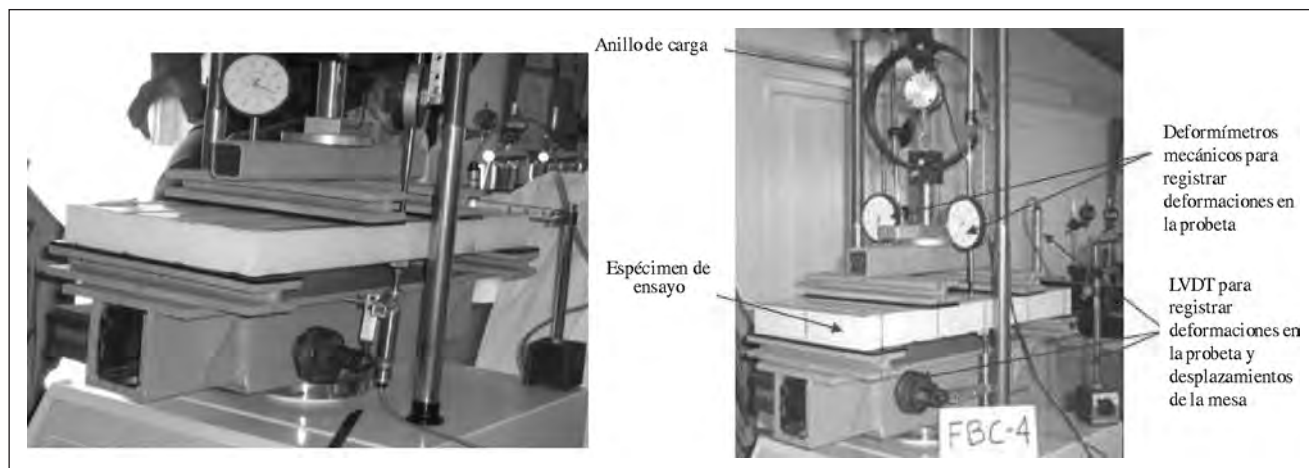


Figura 2 Montaje para ensayos de flexión con nervaduras paralelas y perpendiculares al sentido de la luz.

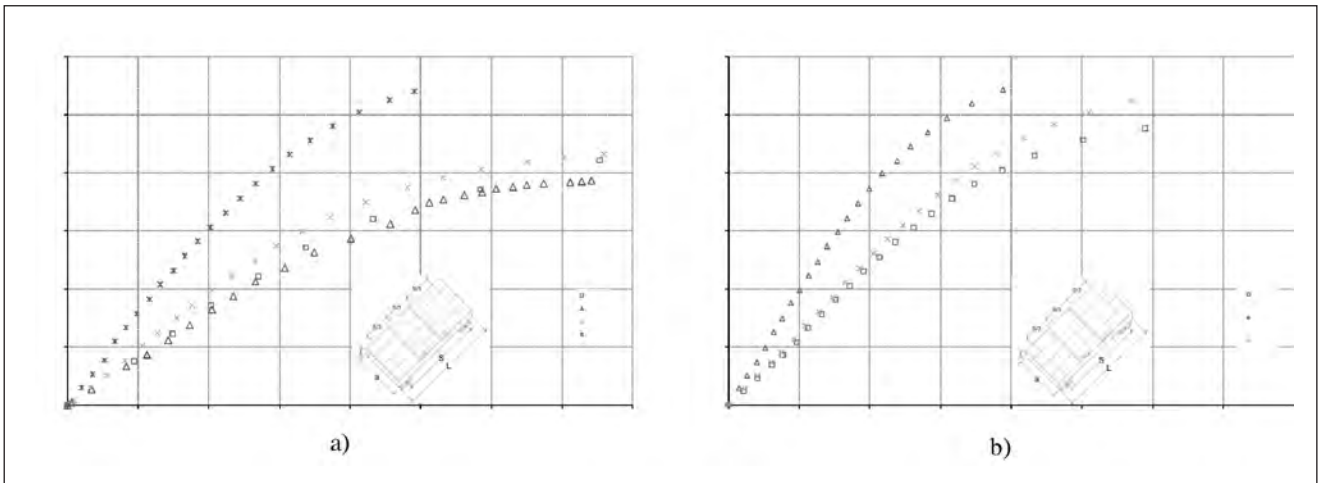


Figura 3 Curvas Carga vs. deflexión, corregidos los ceros, probetas FAT a) y FAC b).



Figura 4 Fallas típicas de las probetas FA (1, 2A y 3).



Figura 5 Probeta FAT-2: a) Montaje; b) Estado final con la carga máxima.

Con los resultados obtenidos se calcularon la rigidez transversal a corte, el módulo de corte del núcleo y la rigidez a la flexión. A partir de las ecuaciones dadas en la norma D 7250/D 7250M-06, ref. 8, en su numeral 10.2.5, cuando se tienen dos configuraciones de carga

de cuatro puntos, una aplicada en los cuartos de la luz (configuración 1) y otra en los tercios de la luz (configuración 2), se dedujeron las siguientes ecuaciones para la rigidez a la flexión (D) y la rigidez transversal a corte (U), válidas cuando la luz es la misma para ambas con-

figuraciones y se miden las deflexiones en ambos casos para el mismo valor de carga. A este procedimiento se le denominará en adelante con la letra A.

$$D = \frac{99 (P) S^3 \left(1 - \frac{92}{99}\right)}{6912 \Delta_1 \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right)} \quad (1)$$

$$U = \frac{(P) S \left(\frac{99}{92} - 1\right)}{2 \Delta_1 \left[\left(\frac{297}{368} \frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right) - 1\right]} \quad (2)$$

en donde:

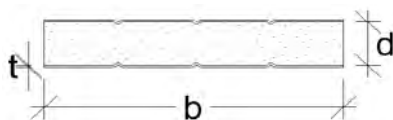
P = Carga total neta aplicada en cada configuración.

S = Luz libre entre apoyos para cada configuración.

Δ_1 = Deflexión neta en el centro de la luz para la carga P (configuración 1)

Δ_2 = Deflexión neta en el centro de la luz para la carga P (configuración 2).

El módulo de corte del núcleo (G) se calcula como una función de U , según se muestra a continuación.



$$G = \frac{U (d - 2t)}{(d - t)^2 b} \quad (3)$$

en donde:

t = grosor del material en las caras exteriores; en este caso, 0,455 mm.

b = ancho de la muestra, 225 mm.

d = grosor nominal del panel, 40 mm.

Se observó que los valores obtenidos en ambos casos presentaron grandes fluctuaciones y valores negativos carentes de significado físico. Pequeños cambios en la relación de las deflexiones obtenidas con cargas iguales en los tercios y en los cuartos de la luz resultan en enormes variaciones en los valores calculados de U y D .

La única explicación que se pudo hallar es falta de uniformidad en las propiedades mecánicas de las diversas zonas de una misma colada.

Ensayos de flexión con nervaduras perpendiculares al sentido de la luz

En los ensayos de flexión de las probetas con nervaduras en sentido perpendicular al de la luz se obtuvieron las curvas Carga vs. deflexión que se muestran en la figura 6 a) para cargas aplicadas en los tercios y 6 b) para las aplicadas en los cuartos de la luz.

Las fallas típicas obtenidas para las probetas FB se presentan más adelante en la figura 7. Las fallas se desarrollaron en las zonas de aplicación de la carga y en los apoyos donde se registraron la falla del poliuretano y el desprendimiento de la lámina inferior, que se extendía hasta el extremo de la probeta.

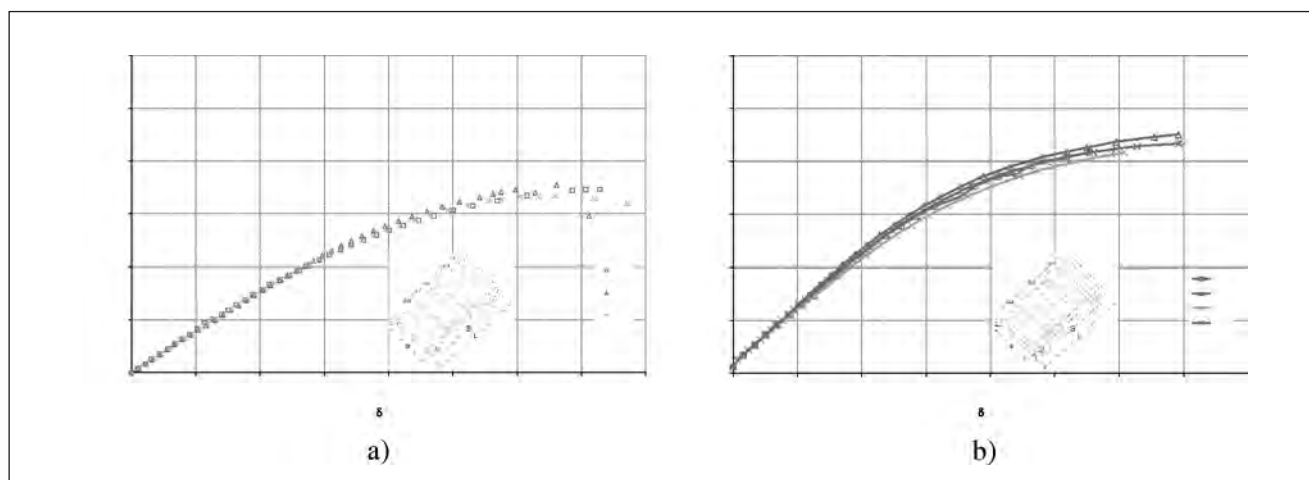


Figura 6 Curvas Carga vs. deflexión corregidas a ceros, probetas FBT a) y FBC b).

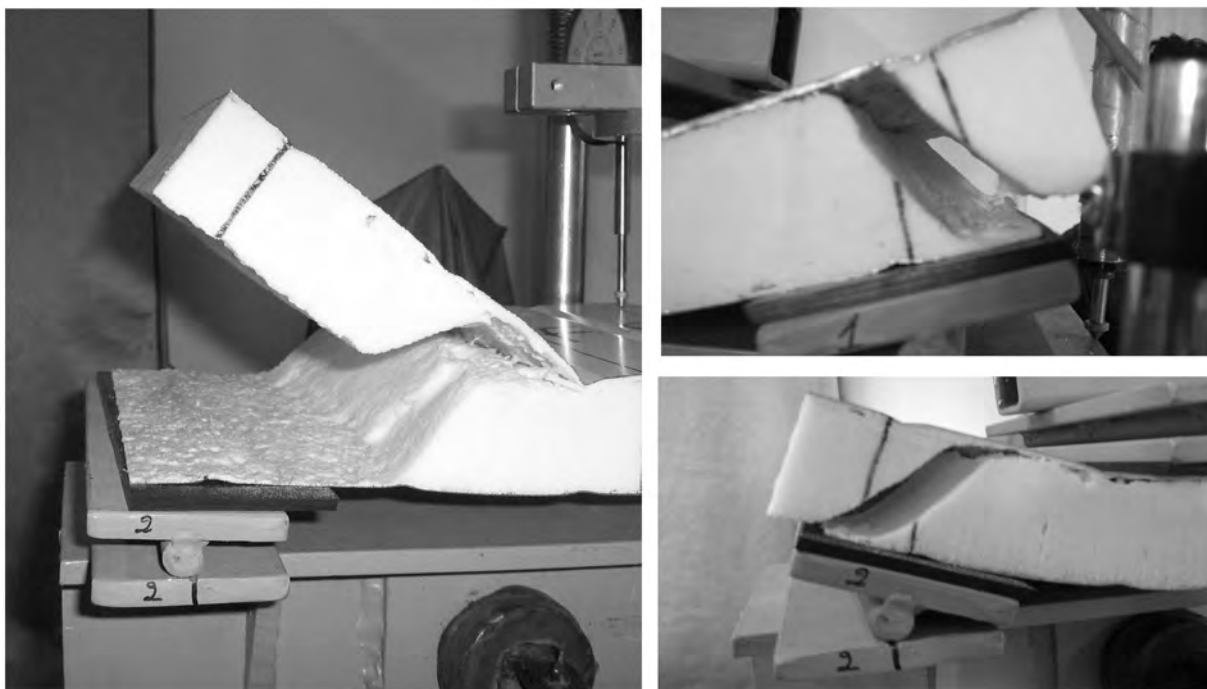


Figura 7 Fallas típicas de las probetas FB.

De forma análoga a como se hizo para los ensayos de flexión paralela, se calcularon los valores de U y D para flexión perpendicular con $P_1 = P_2 = 1000$ N. En este caso se presentaron valores negativos solamente en la rigidez a la flexión, y aunque no se registraron diferencias tan significativas ni valores negativos en el módulo de corte como en las probetas FA, hubo una alta dispersión que hace imposible determinar valores característicos aceptables como los calculados en los ensayos de compresión.

Procedimiento alternativo para evaluar las rigideces

Buscando otra explicación para la variabilidad de resultados y ante la imposibilidad de los investigadores de obtener las ecuaciones de la ref. 8 utilizadas atrás, se resolvió entonces usar el teorema de Castigliano o el Principio del Trabajo Virtual para evaluar las deflexiones en el centro de la luz correspondientes a las dos hipótesis de carga consideradas. Con cualquiera de estos dos métodos, que en adelante se denominará método B, se llega a las ecuaciones (4) y (5), con la misma nomenclatura anterior.

$$EI = \frac{PS^3}{2} \frac{1}{\left(\frac{3456}{7} \Delta_1 - \frac{2592}{7} \Delta_2\right)} \quad (4)$$

$$AG = \frac{PS}{2} \frac{1}{\left(\frac{297}{7} \Delta_2 - \frac{368}{7} \Delta_1\right)} \quad (5)$$

Al aplicar estas ecuaciones a los datos de carga y deflexiones de los ensayos se observó que los resultados obtenidos coinciden perfectamente para EI, pero que hay una relación de cuatro (4) entre los valores obtenidos para AG con las ecuaciones de la ref. 8 y los encontrados por Castigliano. Quizás esta diferencia se deba a que se usó un coeficiente K de uno en estas últimas ecuaciones, a sabiendas de que para una sección rectangular dicho valor es 1,2. La implicación sería que en la deducción de las ecuaciones de la referencia citada se trabajó con $K = 4$.

Si se desprecia la deflexión debida a corte y se considera que la deflexión total es debida a flexión, que se llamará método C, la rigidez correspondiente se puede calcular para uno y otro caso con las siguientes ecuaciones:

$$EI = 11 PS^3 / (768 \Delta_{cl1}) \quad (6)$$

$$EI = 23 PS^3 / (1296 \Delta_{cl2}) \quad (7)$$

Que con $P = 1000 \text{ N}$ y $S = 450 \text{ mm}$ conducen a los valores característicos para ambas series de probetas de la cuarta columna de la tabla 2. La fila FA* corresponde a los valores resultantes cuando se ignoran los resultados de las probetas FAC2 y FAT2, por estar muy alejados de los otros.

Finalmente, si se sigue el procedimiento indicado en las refs. 8 y 9 para evaluar la rigidez teniendo en cuenta únicamente las láminas de acero, que se llamará método *D*:

$$D = E \frac{(d^3 - c^3)b}{12} \quad (8)$$

En donde d es el espesor total del panel, c el del núcleo de poliuretano y b el ancho de éste. Remplazando, para un ancho nominal de 225 mm, un espesor nominal total de 40 mm, $E = 200.000 \text{ MPa}$ y láminas de calibre 26: $t = 0,455 \text{ mm}$, $c = 39,09 \text{ mm}$, da el siguiente valor:

$$D = EI = 16\,010 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Considerablemente mayor que el mostrado en la cuarta columna de la tabla 2.

La ref. 7 da la siguiente expresión para el cálculo de U en función de la deflexión Δ en el centro de la luz:

$$U = \frac{P(S_1 - L_1)}{4 \left(\Delta - \frac{P(2S_1^3 - 3S_1L_1^2 + L_1^3)}{96D} \right)} \quad (9)$$

En donde L representa la distancia entre las cargas. Aplicando esta ecuación con el valor de D calculado así y los valores de deflexión medidos en los ensayos de las probetas FA, se obtienen los valores característicos de las dos últimas columnas de la tabla 2.

Los valores de G obtenidos por este procedimiento tienen el mismo orden de magnitud que los dados por Koschade, ref. 9.

Tabla 2

Valores característicos de rigidez a flexión EI_p , de rigidez al corte AG_p y de Módulo cortante G_p para las probetas FA y FB

Probetas	n	k	EI_p	AG_p	G_p
			($\text{N} \cdot \text{mm}^2$)	(N)	(MPa)
Método			C	D	D
FA	7	2,25	230	10616	1,18
FA*	5	2,46	194	17043	1,89
FB	7	2,25	276	13385	1,49

Ensayos a flexión realizados en la planta de Metecno

Como los resultados encontrados en los ensayos de la Escuela Colombiana de Ingeniería presentaron una alta dispersión y adicionalmente se hallaron valores negativos que hacían imposible determinar los valores característicos de EI y de AG (necesarios para alimentar el programa de análisis por elementos finitos), además de las enormes diferencias obtenidas por los diversos métodos para evaluar dichas propiedades, se optó por ensayar probetas de mayores dimensiones en la planta de Metecno en Santander de Quilichao, con la supervisión del director de la investigación, para aprovechar las facilidades de control y toma de datos de su máquina de ensayos marca Lloyd Instruments-SKU, modelo LR10KPlus, con capacidad de 10 kN.

Se ensayaron, por una parte, probetas de paneles Monowall 40, utilizados como muros exteriores e interiores, y por otra, probetas de paneles Techmet 25 que se utilizarán como cubierta.

Probetas de paneles Monowall 40

Los paneles Monowall 40 se ensayaron de dos formas: con nervaduras paralelas a la luz y con nervaduras perpendiculares a ella.

Probetas de paneles Monowall con nervaduras paralelas a la luz

Inicialmente se probaron ocho especímenes de Monowall 40 con un ancho de 225 mm y una luz de ensayo de 1000 mm. La mitad de ellos se ensayaron con cargas iguales aplicadas en los tercios de la luz y la otra mitad



Figura 8 a) Ensayo típico de una probeta Monowall 40 con nervaduras en el sentido de la luz. b) Falla típica de una probeta cargada en los tercios de la luz, planta de Metecno.

Tabla 3
Valores estadísticos y característicos para las probetas 08-10 a 15-10

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico (n=8, k=2,19)
EI (N•m ²)	C	2100	238	11,3	1632
AG (N)	D	21919	2766	12,62	16.430
G (MPa)	D	2,44	0,307	12,62	1,83

con cargas en los cuartos de la luz. La carga puntual de la máquina se distribuía en dos líneas de carga por medio de viguetas de repartición como se puede ver en la figura 8 a); cada ensayo se llevó hasta la falla. En la figura 8 b) se muestra una falla típica de una probeta.

Llamó la atención la diferencia obtenida según se cargara por la cara interna o externa. La explicación es que cada cara procede de un rollo de lámina diferente, que incluso pudo haber sido suministrado por diferentes proveedores.

De las gráficas Esfuerzo vs. deflexión se tomaron los valores de deflexión para una carga de 400 N y con dichos valores se elaboró un cuadro similar al que se había hecho para las probetas FA ensayadas en la Escuela. Los resultados presentaron una dispersión semejante a la obtenida en esos ensayos, por lo cual se concluyó que ésta no correspondía ni al tamaño de las

probetas ni a la precisión de los equipos sino a una gran variabilidad de las propiedades mecánicas obtenidas en el proceso de fabricación.

Los valores estadísticos y característicos para estas probetas, calculados con los métodos *C* y *D*, ya descritos, se pueden ver en la tabla anterior (tabla 3).

En vista de los muchos valores irreales obtenidos se consideró indispensable que las dos configuraciones de carga: en los cuartos de la luz y en los tercios de ella, se hicieran sobre las mismas probetas, cuidando de no exceder el límite de proporcionalidad en ningún caso.

Con base en los diagramas Carga vs. deflexión se decidió llevar las probetas definitivas con nervaduras en el mismo sentido de la luz hasta una carga de 400 N, para garantizar que no se sobrepasara el límite de proporcionalidad. Los resultados obtenidos por los diversos métodos se muestran en la tabla 4 (página siguiente):

Tabla 4

Valores estadísticos y característicos para las probetas con nervaduras paralelas a la luz, 16-10 a 34-10, ensayadas en la planta de Metecno, eliminando resultados negativos o muy alejados del promedio

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico (D: n=46, k=1,83) (Dpr:n=312, k=1,55)
EI1 (N•m ²)	A	3093	608	19,67	2061
EI2a (N•m ²)	C	1952	193	9,89	1575
EI2b (N•m ²)	C	1900	188	9,90	1533
AG1 (N)	A	205504	62591	30,46	10.6587
AG2 (N)	B	51376	15648	30,46	26.647
AG (N)	D	20687	1768	8,55	17.505
AG (N)	Dpr	19255	1769	9,19	16.647
G1 (MPa)	A	23	7,0	30,46	12
G2 (MPa)	B	5,84	2,0	30,46	3,03
G (MPa)	D	2,30	0,196	8,55	1,94
G (MPa)	Dpr	2,14	0,197	9,19	1,85

Probetas de paneles Monowall 40 con nervaduras perpendiculares a la luz

El mismo proceso se repitió con probetas de paneles Monowall con las nervaduras perpendiculares a la luz. Por ofrecer menor resistencia, la carga se limitó a 200 N, y por estar limitados al ancho del panel fue necesario reducir la luz a 800 mm.

Más adelante, en la figura 9, se muestra la disposición de las probetas y en la figura 10 los tipos de fallas que se presentaron.

Los resultados de aplicar los diferentes métodos se registran en la tabla 5.



Figura 9 Ensayos típicos de probetas con nervaduras perpendiculares a la luz.

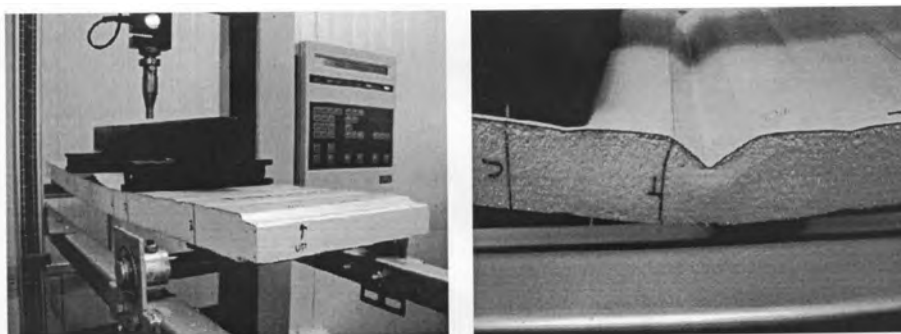


Figura 10 Fallas típicas de probetas Monowall 40 con nervaduras perpendiculares a la luz.

Tabla 5
Valores estadísticos y característicos para las probetas perpendiculares a la luz, descartando los valores negativos y los valores extremos

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico (D ₁ : n=5, k=2,46) (D ₂ : n=24, k=1,91) (D _{pr} : n=384, k=1,48)
EI1 (N•m ²)	A ₁	2186	863	39,49	792
EI2a (N•m ²)	C ₁	672	8	1,14	654
EI2b (N•m ²)	C ₁	641	5	0,78	628
AG1 (N)	A ₁	57585	10382	18,03	36.401
AG2 (N)	B ₁	14396	2596	18,03	9100
AG (N)	D ₂	9726	225	2,32	9302
AG (N)	D _{pr}	9967	313	3,14	9514
G1 (MPa)	A ₁	6,4	1,2	18,03	4,04
G2 (MPa)	B ₁	1,64	0,30	18,03	1,03
G (MPa)	D ₂	1,08	0,025	2,32	1,03
G (MPa)	D _{pr}	1,11	0,034	3,10	1,06

Probetas de paneles Techmet 25

En la siguiente etapa de la investigación se probaron probetas de los paneles de techo Techmet 25, tanto con las crestas paralelas a la luz como perpendiculares a ella. Teniendo en cuenta que la sección transversal no es simétrica y que las cargas de viento pueden producir

succión que supere el peso propio, y ante la carencia de una cámara de vacío para simular dicha succión se optó por aplicarles cargas gravitacionales tanto en posición normal como en posición invertida.

En la figura 11 se presenta la disposición de las probetas para los cuatro tipos de ensayos.



a) Probetas con nervaduras paralelas a la luz.



b) Probetas con nervaduras perpendiculares a la luz.

Figura 11 Disposición de las probetas hechas con paneles Techmet 25, para los cuatro tipos de ensayos.

Probetas de paneles Techmet 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido normal (crestas hacia arriba)

El compendio de todos los resultados obtenidos para este tipo de probetas se presenta en la tabla 6. Para el método *D*, en el cual se considera que la rigidez a flexión la proporcionan sólo los elementos de acero, los cálculos se hicieron con $EI=26.850 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ y $A=11.183 \text{ mm}^2$.

Se observa una gran disparidad entre los valores obtenidos por los diferentes métodos e incluso valores negativos de *AG* con los métodos *A* y *B*, que son absurdos pues no tienen ningún significado físico. Los más confiables son los obtenidos con el método D_{pr} , que dan un valor lógico de *G*.

Probetas de paneles Techmet 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido invertido (crestas hacia abajo)

El compendio de todos los resultados obtenidos para este tipo de probetas se puede ver en la tabla 7.

Se aplican los mismos comentarios hechos para la tabla 6.

Probetas de paneles Techmet 25 con nervaduras perpendiculares a la luz

Las deflexiones en el centro de la luz obtenidas con las dos configuraciones de carga y la relación existente entre ellas se presentan a continuación en las tablas 8 y 9. La primera de ellas corresponde al caso normal

Tabla 6

Valores estadísticos y característicos para las probetas Techmet 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido normal (crestas hacia arriba) T13 a T15 y T31 a T33, con $EI= 26850 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ para $P1 = P2 = 1200 \text{ N}$; $S1 = S2 = 1000 \text{ mm}$

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico ($D: n=6, k=2,34$) ($D_{pr}: n=336, k=1,52$)
EI1 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	A	1236	319	25,8	641
EI2a ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3085	452	14,7	2120
EI2b ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3494	441	12,6	2523
AG1 (N)	A	-73054	24411	-33,4	NA
AG2 (N)	B	-18264	6103	-8,35	NA
AG (N)	D_{pr}	30923	6967	22,53	20891
G (MPa)	D_{pr}	2,77	0,623	22,53	1,87

Tabla 7

Valores estadísticos y característicos para las probetas TECHMET 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido invertido (crestas hacia abajo) T16 a T18 y T34 a T36 con $EI=26850 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ para $P1 = P2 = 1500 \text{ N}$; $S1 = S2 = 1000 \text{ mm}$

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico ($D: n=6, k=2,34$) ($D_{pr}: n=408, k=1,45$)
EI1 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	A	1831	274	15,0	1288
EI2a ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3413	118	3,5	3145
EI2b ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3661	109	3,0	3413
AG1 (N)	A	-131261	67.521	-51,4	NA
AG2 (N)	B	-32815	16.880	-51,4	NA
AG (N)	D	33678	3368	10,0	28982
G (MPa)	D_2	3,01	0,301	10,0	2,59

Tabla 8
Deflexiones medidas para las dos configuraciones de carga para las probetas Techmet 25 con nervaduras perpendiculares a la luz y sentido normal (crestas hacia arriba) T22 a T24 y T28 a T30 para $P_1 = P_2 = 40$ N; $S_1 = S_2 = 800$ mm

Probeta	Δ_1 (mm)	Δ_2 (mm)	Δ_2/Δ_1
T22	3,6859	5,9809	1,6226
T23	3,5241	5,9963	1,7015
T24	3,4436	5,6059	1,6279
T28	2,4627	7,3665	2,9912
T29	2,9643	6,2062	2,0937
T30	3,4714	6,4706	1,8640
Promedio	3,2587	6,2711	1,9835
Desv. estándar	0,4588	0,6076	0,5250
Coef. de variación	14,08%	9,69%	26,47%

Tabla 9
Deflexiones medidas para las dos configuraciones de carga para las probetas Techmet 25 con nervaduras perpendiculares a la luz y sentido invertido (crestas hacia abajo) T19 a T27, para $P_1 = P_2 = 40$ N; $S_1 = S_2 = 800$ mm

Probeta	Δ_1 (mm)	Δ_2 (mm)	Δ_2/Δ_1
T19	2,4188	4,2803	1,770
T20	2,9303	3,7234	1,271
T21	2,8034	3,4185	1,219
T25	1,8560	3,6129	1,947
T26	2,4712	3,9657	1,605
T27	2,6362	3,8507	1,630
Promedio	2,5193	3,8086	1,5737
Desv. estándar	0,3783	0,2989	0,2827
Coef. de variación	15,02%	7,85%	17,96%

(crestas hacia arriba) y la segunda al sentido invertido (crestas hacia abajo).

No se intentó calcular valores de EI y AG por constituir ahora una viga de sección variable compleja a lo largo de la luz, que requeriría un análisis numérico complicado sin justificación práctica.

Tan solo se puede concluir que también en este caso la rigidez que ofrece la cubierta a una succión ocasionada por el viento sería bastante mayor que la que se tiene ante cargas gravitacionales, puesto que la relación entre las deflexiones promedios causadas para cargas aplicadas en los cuartos de la luz es 0,77 y para cargas aplicadas en los tercios 0,61.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

1. Aunque los paneles sándwich de espuma de poliuretano y revestimiento metálico se idearon fundamentalmente para servir como divisiones o cerramientos con el propósito de aislar un recinto dado y se ha demostrado, con el uso durante muchos años, que ese papel lo desempeñan satisfactoriamente, por su naturaleza tienen una resistencia intrínseca para soportar diversas clases de sollicitaciones. Con el fin 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%.
2. Si bien los resultados de los ensayos hechos en probetas pequeñas sometidos a cargas axiales muestran valores razonables que permiten aplicarlos en un análisis por elementos finitos, como se indicó en la ref. 6, los obtenidos en ensayos de

probetas sometidos a cargas de flexión, en cambio, presentan una alta dispersión y al aplicar los métodos de mecánica clásica conducen en muchos casos a valores absurdos, por no tener ningún significado físico. Los mejores resultados para los paneles utilizados como muros se obtuvieron suponiendo que la rigidez a flexión es proporcionada únicamente por las láminas del revestimiento.

3. Lo mismo puede decirse de los obtenidos para probetas con paneles de techo cuando las nervaduras están en el sentido de la luz.
4. Cuando las nervaduras están en sentido perpendicular a la luz por tener sección variable a lo largo de ella, no se justifica intentar calcular los valores de EI y AG. Los resultados experimentales sirven simplemente para verificar que, también en este sentido, la resistencia ante una succión causada por el viento sería mucho mayor que la presente ante cargas gravitacionales.
5. En consecuencia, dada la gran dispersión de las propiedades obtenidas en esta serie de ensayos, un análisis por elementos finitos sólo permitirá identificar los puntos críticos de la edificación y su sensibilidad ante los cambios de propiedades.
6. Por consiguiente, esta primera etapa de la investigación ratifica la necesidad, planteada desde el comienzo, de ensayar paneles completos simulando las condiciones reales como base para plantear un método de cálculo que permita homologar el sistema ante la autoridad competente.

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, Sandra Rocío Jerez Barbosa y Sebastián López Restrepo, 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. Evaluación de la rigidez axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural, Uribe, Jairo.- *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 2012.
7. *SAP 2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Program* (2011). Computers & Structures, Inc. Berkeley, CA, EE.UU.
8. *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.
9. *Norma española EN 14509-06 A.3: Ensayo de resistencia al esfuerzo cortante sobre material del núcleo* (2007). Asociación Española de Normalización y Certificación (Aenor), Madrid.
10. *Sandwich Panel Construction*, Koschade, Rolf. – Ernst & Son, ISBN 3-433-01617-8, Berlín, 2002.

Entrevista

“Lo primordial es montar un sistema integrado de transporte público”

Angélica Castro Rodríguez

Por Cristina Salazar Perdomo



Ingeniera civil de la Escuela, especialista en Gestión Pública e Instituciones Administrativas de la Universidad de los Andes y magíster en Planeación de Transporte de la Universidad de Leeds, en el Reino Unido. Ha sido subgerente general y directora técnica de Planeación de Transporte de Transmilenio S.A., jefa de Transporte y de Política y Apoyo a la Descentralización de la Unidad de Infraestructura y Energía, así como asesora de la Agencia de Cooperación Técnica Internacional en Infraestructura del Departamento Nacional de Planeación, y directora de Geosoluciones en Construcciones Técnicas de Ingeniería. Profesora universitaria y conferencista internacional, es la actual directora técnica de la compañía mexicana Transconsult, S.C. Veinte años de experiencia, y sobre todo una gestión exitosa dentro y fuera del país, la convierten en una experta en materia de movilidad. De este tema y de la formación de los nuevos profesionales habló para la Revista de la Escuela.

Para hablar de la movilidad en Bogotá, empezamos por referirnos a los numerosos estudios que se han hecho desde los años cincuenta y que inquietan al ciudadano de a pie porque da la impresión de que siempre se parte de cero.

Sí, se han hecho estudios desde hace muchísimos años, pero lo que pasa es que las condiciones cambian porque la ciudad es dinámica. Sin embargo, si se analiza con profundidad este tema se encuentra que los estudios no parten de cero porque finalmente los corredores que se necesitan para el transporte público, colectivo, masivo, son los mismos que se requerían hace bastante tiempo. No hay que ser un especialista para saber que la mayor demanda de esta ciudad va por la avenida Caracas, que la autopista Norte tiene alto tráfico, que la carrera séptima es un corredor muy importante, y que hay otras vías que alimentan, como la calle 13, la avenida de las Américas, la NQS o la avenida Suba. Lo otro es que nunca se parte de cero y hacer nuevos estudios no significa que los pasados no sirvieron. Todos, en un momento determinado, sirven. Las decisiones no son solamente técnicas sino que tienen también un componente técnico y financiero, de acuerdo con las circunstancias, con el enfoque de ciudad que se quiere y las condiciones financieras. Ese ha sido el punto de discusión a este respecto. Quién no quiere tener una ciudad llena de parques, por ejemplo, pero hay situaciones en las cuales no se puede. Las discusiones que ha habido en torno a la movilidad se han centrado en el aspecto financiero. Todos quisiéramos tener un proyecto bueno y una red de metro que se integrara con los buses, pero hay cuestiones económicas y de visión de ciudad que son inalcanzables. Hay que conciliar qué es lo que se quiere y qué es lo que se puede, lo que le conviene a la ciudad.

Hace poco fue noticia el hecho de que Ecuador va a tener metro hacia 2016. Uno se pregunta por qué un país más pequeño que Colombia puede lograrlo, aparentemente sin tanto tropiezo.

Uno revisa los periódicos de hace tres años y también encuentra “Bogotá va a hacer un metro”. De ahí a que sea una realidad hay una distancia gigantesca. Desde el punto de vista netamente académico se pueden hacer las comparaciones que se quiera, pero insisto en que el tema no es solamente financiero, es de participación de los transportadores, de cuánta demanda se va a cubrir. Tener un metro es lo más fácil, pero una línea de metro de 10, 20 o 30 kilómetros, que sería lo que podríamos hacer, ¿cuánta demanda verdadera atendería? Claro que está el otro lado, que recomienda arrancar de alguna manera, así sea con poco. Por esto hay que mirar la ciudad en forma integral. Es muy triste que la discusión haya terminado siendo política, porque ha sido la bandera de los tres últimos alcaldes. Y decirlo en una campaña política es muy fácil, pero hacerlo realidad es muy difícil. Así, todos hemos terminado en una discusión de si es transporte público colectivo, si es Transmilenio o si es el metro, cuando en realidad a Bogotá hay que verla en conjunto; se trata de mezclar esas acciones para tener un buen transporte en la ciudad.

Para mejorar la movilidad se han propuesto otras opciones, como la del teletrabajo o el uso de las bicicletas, que van más allá de ampliar la infraestructura y les apuntan a los hábitos ciudadanos. De acuerdo con su experiencia en Colombia y en otros países, ¿qué medidas serían igualmente viables?

A mi juicio, lo primordial es montar un sistema integrado de transporte público. Una ciudad como ésta, con ocho millones de habitantes, necesita una integración organizada en el transporte público con un ente que vigile. Para mí, la mejor experiencia es la española. En Madrid funciona el Consorcio de Transporte, que incluye el sistema de transporte urbano y el interurbano, como trenes y buses

de cercanía. Todas las acciones se emprenden independientemente de que los trenes de cercanía sean de una empresa o de otra. Los buses tienen otros propietarios e igual pasa con el metro. Ellos lograron que al ciudadano no le afecte de quién es el sistema, sino que todo gire en torno a él. Cuentan con unas terminales en las que se integran el taxi, el bus, el metro, el tren. En Bogotá, el asunto del metro sigue todavía con una empresa aparte del resto del transporte, el Transmilenio es de otros y el transporte público colectivo es de la Secretaría de Movilidad...

Ese es el gran problema que tenemos: que creemos que son buses o metro o trenes ligeros. No puede ser así, debe mirarse en conjunto, incluyendo los taxis y los bicitaxis, que hoy forman parte del transporte público de la ciudad, aunque los veamos como algo peligroso y antiestético. Bueno, por lo menos se dio un gran paso con la implementación del sistema integrado.

Otro aspecto que también ha sido muy discutido es la utilización del vehículo particular. Hay ciertas contradicciones: por un lado, se quiere desestimular su uso, pero por otro, aumentan las facilidades para adquirir incluso más de un carro. Según su experiencia en otros países, ¿qué tan dispuesta ha estado la gente a poner de su parte para mejorar la movilidad?

La principal razón por la cual se quiere desincentivar el uso del carro particular es la congestión vehicular. Hay quienes son mucho más románticos y dicen que es para proteger el medio ambiente, pero en realidad el tema de fondo es la congestión. Es triste ver el estado en que se encuentra la malla vial de Bogotá. Entonces, hay que pensar en reparación de infraestructura vial, en sincronización semafórica, en señalización, en parqueaderos. La ciudad se ha deteriorado mucho y para recuperarla no se requieren sólo acciones particulares sino del gobierno.

No basta con prohibir el uso del carro y mejorar el transporte público, sino que hay una serie de aspectos adicionales. Por ejemplo, garantizar el desplazamiento de los peatones por los andenes, hoy en día congestionados



otra vez por las ventas ambulantes; es cuestión de política pública, más allá del tema exclusivo del transporte privado. Retomando la pregunta, sí es una incongruencia. Lamentablemente, las políticas vienen de diferentes sectores: mientras que el que tiene que ver con la movilidad está pensando en desincentivar el uso del vehículo particular y lograr que la gente sea consciente de que hay que compartir el carro, el comercial refuerza sus promociones y beneficios.

Casi todos los países tienen el mismo problema. En Londres, París y Nueva York, con todo y sus redes de metros grandes, también existe congestión. Hay que empezar a dar palo, es decir, a regular. Por ejemplo, hoy las motocicletas están reguladas en lo referente a seguridad vial pero no en materia de movilidad.

¿Qué se ha hecho en cuanto al uso del carro particular?

En Londres se han implementado unas tarifas de congestión, como las que ha mencionado el alcalde Petro, para poder acceder a ciertos sitios de la ciudad luego de pagar peaje. La sobretasa a la gasolina ha servido para financiar, pero ya todo el mundo la incluye en su presupuesto. Técnicamente hay muchas restricciones, mucho más allá del pico y placa, que pueden desincentivar el uso del carro particular.

Por desgracia esas políticas de gobierno son muy atacadas, porque justamente los que tienen carro son los que acceden a la prensa, entonces presionan por ahí. Hay otras opciones, como la de compartir el carro, que se conoce como *carpool*. Es decir, las personas que viven en un área de dos kilómetros a la redonda y trabajan en la misma empresa se pueden poner de acuerdo para ir juntas y se turnan. En Alemania uno llama y solicita el *carpool*. Tiene que pagar un poco, pero equivale a lo de la gasolina o el parqueadero. En Washington se puede alquilar un carro, se paga con tarjeta de crédito, se saca de un sitio y se deja en otro. En Los Ángeles, el que va solo en su carro tiene que desplazarse por el carril congestionado y el que lleva más de dos personas accede al carril más libre.

También se ha propuesto usar bicicletas públicas...

Es una idea maravillosa. Esto se puso de moda en París y actualmente las únicas ciudades que cuentan con este programa, aparte de la capital francesa, son Washington y México, D.F. A propósito: nadie habría creído que Ciudad de México fuera capaz de tener las bicicletas en muy buenas condiciones.



Bogotá dispone de una infraestructura con la que no cuenta ninguna ciudad del mundo para las bicicletas y no hemos sido capaces de montar ese programa. Cómo funciona: el usuario inscribe una tarjeta de crédito y esto le permite tomar la bicicleta para trasladarse de un punto a otro, sin pagar mantenimiento ni parqueadero. Es un asunto de política pública que ha funcionado muy bien en las tres ciudades que mencioné.

Volviendo al tema del pico y placa, algunos expertos han dicho que no debe ser una medida permanente, sino que tarde o temprano hay que quitarla. En este momento, en qué países se mantiene o dónde, después de adoptar otras medidas, lo han quitado.

México no tiene pico y placa pero sí restricciones ambientales. Empezó con todos los carros y ahora los nuevos no tienen restricción, lo cual hace que la gente renueve. A partir de un año determinado, se impone la restricción y además el vehículo se tiene que someter a unos controles más estrictos de emisiones. Difiero de quienes dicen que el pico y placa no tiene que ser permanente. Puede serlo, pero el asunto es que no puede ser la única política para desincentivar el uso del carro.

Qué opina de este nuevo formato de pico y placa. Qué tanta vida le calcula, sobre todo sabiendo que se puede sacar el carro después durante unas seis horas.

La verdad, no sé cuánto pueda durar. Lo cierto es que existe la sensación de que pasamos a tener sábados todos los días. Ahora, no sólo es importante el aspecto de movilidad. El ambiental también. Finalmente nos acomodamos a todo, porque uno puede hacer acuerdos para llegar más tarde a la oficina. Lo bueno es que se agiliza el tráfico en

las horas pico porque algunos salen antes de las seis de la mañana y otros después de las ocho y media. Claro que también se corre el riesgo de que se presenten mayores viajes en las horas valle, lo cual no se daba antes. No tiene mucho sentido, además, que funcione bien por dos horas y el resto del día mal.



Al principio pareció práctico porque se puede sacar el carro en el día, después del periodo de restricción...

Eso se debe a la congestión que se genera justo en la hora valle porque antes la gente no salía o esperaba el día en que no tuviera pico y placa. Hoy lo hace todo el mundo y por eso se convirtió en un sábado.

En todos estos años en que ha podido conocer los sistemas de otros países, cuéntenos qué tanta influencia ha tenido ese movimiento de cultura ciudadana que en Bogotá fue tan fuerte y que incluso lo estaban imitando en otras ciudades.

Ha sido increíble. Mucho más allá del tema de educación vial, Bogotá se convirtió en un ícono en el mundo entero. Voy a muchos congresos de transporte público y no hay uno en el que no se hable de Bogotá y de Colombia. A nosotros sólo nos conocían por el aspecto del narcotráfico, pero por fortuna hoy, en el mundo del transporte, Colombia es conocida como un país donde se han hecho cosas interesantes y se han preparado grandes profesionales. Es enorme el número de colombianos que trabaja en la actualidad en el ámbito internacional. Esto se debe a tres factores muy importantes. Primero, porque fue un *boom* que aprovechamos todos los que hemos terminado en el tema del transporte y en el de movilidad. Segundo, por la educación; aquí la criticamos mucho, pero cuando uno

la mira en otros países similares a Colombia, nos damos cuenta de que es muy buena. Tercero, somos personas agradables, tenemos facilidad para interactuar, somos pilísimos y excelentes trabajadores. Además de los beneficios del ambiente de movilidad, pues son muchísimos los colombianos que hay en la banca multilateral; en todos los proyectos hemos tenido gente: en Indonesia, Sudáfrica, Corea, Vietnam, China e Inglaterra. En México, alguien dijo una vez: “Oiga, ¿y es que para que las consultoras de este país sean buenas deben tener a una colombiana?”. Y es que todas tienen colombianos muy buenos. El tema es mucho más grande y uno aquí no se da cuenta porque está todo el tiempo criticando lo que pasa. Hay un gran reconocimiento a escala internacional, nos buscan de todas partes del planeta.

En ese aspecto comparo a los colombianos con los brasileños, que han sido excelentes en materia de transporte público, pero pienso que no ha habido un cambio generacional. En Colombia sí.

Volviendo al tema de la educación, de la cultura ciudadana, es algo que se le debe reconocer al gobierno de Antanas Mockus y sus visionarios. Ellos, con mucha fuerza, filosofía y conocimiento, han podido llevar más allá el tema de la educación vial. Lástima que ese tipo de cosas buenas no las sigan rescatando. Los he visto actuando en México, en otras partes, pero no con la contundencia de cuando se es alcalde. Él tiene en la cabeza todo ese concepto y cuando fue alcalde lo hizo realidad.

Ahora, no sólo Bogotá es famosa internacionalmente. El caso de Medellín es digno de admirar. Los países tienen una gran ventaja y es que jamás hablan mal de sus cosas. Por ejemplo, el metrocable: Medellín lo puso de moda en el mundo entero. De hecho este año, en enero, en el congreso más importante en el mundo del transporte, que se celebra en Washington, esta ciudad compartió con San Francisco el Sustainable Transport Award 2012, por sus proyectos de movilidad sostenible. También dentro de las dimensiones de sistemas de transporte masivo basado en buses, hoy Pereira es un referente. Entonces, hay que seguir arreglando las cosas, pero hoy Colombia es reconocida en movilidad mucho más de lo que uno se imagina.

Una de las tantas razones por las cuales ciertas medidas no funcionan es precisamente porque no hay una política de Estado y los programas y proyectos quedan a merced de cada gobernante. ¿Sucede esto en otros países?

Los países en los que las políticas se mantienen son los más desarrollados. En Colombia y en América Latina el

largo plazo son cinco años. Entonces usted encuentra que el Portal de la 80 se quedó pequeño a los dos años de operación; se hizo un portal como el de las Américas para que tuviera una proyección y lo tildaron de elefante blanco. Somos cortoplacistas. Y hay países, como Japón, donde el largo plazo son 25 o 30 años. Eso no garantiza ni en Japón ni aquí que halla un seguimiento a las políticas de Estado. Con el Plan de Ordenamiento Territorial se ha tratado de hacer, pero finalmente en nuestros países es muy difícil.

Abora que usted hablaba de la educación, pensaba en que terminó su carrera hace 20 años. Hoy en día hay mucho terreno abonado, pero en 1991 hacerse un nombre como ingeniera, como colombiana... Cómo fue ese proceso tan interesante, porque hoy usted es reconocida como experta internacional y me imagino que eso es producto de mucho trabajo.

Lo primero que tengo que decir es que la vida nos lleva a hacer ciertas cosas, nos da oportunidades y nosotros las aprovechamos o no. Ese es mi gran mensaje. Qué oportunidades tuve: para empezar, hice una reflexión muy grande siendo estudiante. En esa época me criticaron porque decidí ser partícipe de la política colombiana. Lo hice porque me parecía muy injusto que todos criticáramos al gobierno, habláramos mal de los empleados públicos, desde lejos, sin involucrarse; ver gente que hablaba de corrupción y luego darse cuenta de que en el sector privado también hacían cosas no muy santas para acceder a los contratos. Entonces analicé la situación y luego tuve la oportunidad de conocer a Enrique Peñalosa, quien vio tal vez mi personalidad... Creo que fue eso porque si usted revisa los registros, nunca fui la mejor alumna, participé en muchas cosas y sin ser académicamente excepcional, sí me interesaba mucho no sólo entender y criticar sino actuar. Y decidí en ese momento ser servidora pública. El primer año trabajé en una empresa privada, en una constructora, y empecé a postularme para ingresar a Planeación Nacional. Un año después me contrataron. Aproveché esa oportunidad que luego me llevó a especializarme. Y aquí quiero enviarles un mensaje a los muchachos: las becas se pierden en todas partes porque a la gente le da pereza llenar papeles. Claro que hoy, con la globalización, los jóvenes hacen mucho más esas búsquedas y su interés es mayor, pero de todos modos hay que plantear la inquietud desde el principio para que busquen porque ahí están las ofertas. Si yo hubiera esperado a que mis papás me pagaran mi educación en Inglaterra, nunca lo hubiera hecho. La segunda parte es que después de salir de la Escuela me llamó un profesor para contarme que había una beca para

estudiar transporte en Popayán. Por diferentes razones no acepté, pero creo que ese fue el inicio de mi vida en el área. Comencé a postularme para becas porque tenía muy claro que quería estudiar, que quería aprender inglés porque ya hablaba francés. Cuando llevaba como dos años en la Dirección de Transporte de Planeación Nacional, en el Icetex me ofrecieron una beca para irme a estudiar a Japón y acepté. Luego me presenté a una universidad en Inglaterra y me aceptaron. Desde entonces, nunca más me pude desprender del transporte.

Me ha llamado la atención que usted dice que no estuvo entre las mejores estudiantes, porque uno ve su hoja de vida y piensa que se graduó con honores. ¿Es más una cuestión de integralidad que de notas altas?

Creo que acaba de decir la palabra que es. Me considero exitosa no por los cargos que haya desempeñado ni porque me haya ido bien profesionalmente, sino porque he sido una persona feliz, he disfrutado lo que he hecho. En cuanto a las buenas calificaciones, no hay por qué desincentivar que las obtengan pero sí cambiarles la idea de que sólo así les va a ir bien en la vida. La cuestión es aprovechar las oportunidades. Otro aspecto es que no soy de las personas que se guardan la información, aunque todo el mundo diga que con ella uno tiene el poder. A los estudiantes que me contactan porque encuentran mis datos en Google, trato



de ayudarles aunque a veces por tiempo y otros factores no lo pueda hacer. De todos modos siempre estoy dispuesta, porque creo en el trabajo en equipo, en ser parte de un grupo. Por eso no soy consultora individual, con lo cual podría ganar mucho más dinero y vivir más tranquila. Me interesa más ser parte de un grupo.

Actualmente siento que mis profesores me aprecian más como persona que como profesional. Ser bueno en la vida es muy importante. Eso es lo que uno tiene que pensar. Qué pasa con los muchachos: los que son muy buenos son individualistas, tímidos, están metidos en su mundo y son responsables, entonces hay que animarlos a hacer otras cosas y relacionarse con gente que participa en todas las actividades, con los rumberos, los deportistas, los que escriben y leen, los que son capaces de enfrentarse a varias labores al mismo tiempo.

Pasando a otro aspecto, ¿qué tal es usted como jefe?

Soy muy estricta. He logrado que la gente sea capaz de respetarme como jefe y ser mi amiga fuera de la oficina. Por fuera soy querida y parrandera; dentro del trabajo soy muy cumplida con los horarios y le exijo a la gente lo que puede dar. Por esa misma razón me encanta ayudar. Creo que la muestra de haber cumplido como jefe es que hoy muchos de los que han trabajado conmigo son mis mejores amigos. He logrado sacar lo mejor de la gente y transmitir muchas enseñanzas que en su mayoría no son académicas sino de vida.

¿Hubo un choque cultural cuando llegó a trabajar a otro país?

Ese fue otro de los paradigmas que rompí. Llegué a México a una empresa pequeña, que está creciendo a pasos agigantados. En el grupo directivo sólo había hombres y además tenían relación con los dueños, habían sido compañeros de estudio o de trabajo o eran compadres. Se trataba, entonces, de romper esos nexos y convertirla en una empresa de verdad. Por eso me buscaron. Llegué a un país machista, a desempeñarme en un sector hipermachista como es el

del transporte, yo, una mujer y además extranjera y, por si fuera poco, jefe de todos... Fue muy duro para ellos. Para mí no porque he vivido siempre entre hombres: sólo tuve hermanos y primos varones, y en la Escuela había más hombres que mujeres.

Los cuatro gerentes que había eran amables desde el punto de vista personal pero no en el ámbito profesional. Viví seis meses muy duros hasta que lo logré. ¿Cómo? Respeté el hecho de que yo era la intrusa, la que estaba en una cultura ajena. Lo que hice fue adaptarme a ellos, encontrarles el ladito, y cuando me sentí segura, a través de juegos, de mecanismos, de respetarlos y ser muy “cambiadora”, como dicen en México, me integré al equipo y alcancé mi propósito.

Aun teniendo esa personalidad, ¿se estresa?

Obviamente, pero hay dos factores que me ayudan: primero, que tengo mucha paciencia, y segundo, que duermo muy bien. Así que incluso en los peores momentos, porque he vivido instantes muy difíciles, soy capaz de ponerme un caparazón para protegerme.

Hay cierta resistencia de los profesionales, en especial los jóvenes, a ocupar cargos oficiales. Esto es preocupante porque precisamente para luchar contra la corrupción se necesita gente con muy buena formación y valores. ¿Qué piensa de esa actitud prevenida, usted que estuvo en el medio oficial y en un momento dado también tomó la decisión de retirarse?

El sector público es muy desagradecido. Uno tiene que ser consciente de eso. Es un asunto más de filosofía, porque lo más fácil es quedarse en la casa para no tener problemas. Pero de eso no se trata. Pienso que en este país debería ser obligatorio el servicio público. Claro que tal vez no volvería al sector público... es que duré 16 años sirviéndole al país. Es muy absorbente en cuanto a la vida personal y el tiempo, pero creo que es una experiencia que todo el mundo debería tener.

