## LECCIONES DEL CONCURSO DE PUENTES EIA

María del Pilar Duque\*

### RESUMEN

En este artículo se expone la historia, la evolución y las experiencias del concurso de puentes realizado anualmente en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, EIA. Se hace una descripción de los sistemas estructurales básicos usados en puentes, se plantean los puntos débiles de cada uno y se presentan algunos modelos del concurso, analizando su forma de falla según los criterios estructurales. Por último, se describen los puentes ganadores de las cuatro versiones del evento y se expone cómo a través de la experiencia, tanto concursantes como organizadores han logrado superar y elevar el nivel del concurso.

PALABRAS CLAVE: puentes; estructuras; concurso.

### **ABSTRACT**

The history, evolution and experience of the bridge contest carried out every year by the Antioquia School of Engineering (EIA) is exposed. The basic structural systems used for bridges are described, the weak points of every system are brought out and some of the contest models are analyzed, according to their structural system, in the way they fault. At last, winner bridges of the four versions of the event are described, and a study of how, through experience, the contestants and organizers had attained and raised the level of contest is exposed.

KEY WORDS: bridges; structures; contest.

<sup>\*</sup> Coordinadora y docente Área de Estructuras. Escuela de Ingeniería de Antioquia. pfmaduq@eia.edu.co Artículo recibido 8-X-2003. Aprobado con revisión 11-XII-2003. Discusión abierta hasta julio 2004.

### 1. INTRODUCCIÓN

Se define la ingeniería como la capacidad del hombre para modificar la naturaleza en beneficio de la humanidad. Acciones tan simples como construir un techo de ramas y utilizar un tronco como puente demuestran la capacidad del hombre para resolver problemas y suplir necesidades básicas de vivienda y vías de comunicación con el uso de elementos estructurales simples. En un principio, los puentes y viviendas eran naturales, pero en el momento en que se tomó conciencia de que estos pueden construirse y que la naturaleza puede modificarse, se dio inicio a la ingeniería estructural.

En el método natural de aprendizaje de las estructuras se pueden reconocer cuatro etapas: la identificación de una necesidad o problema por resolver, la observación, la experimentación y la conclusión. Los avances en el conocimiento del comportamiento de los sistemas, elementos y materiales estructurales han hecho que el proceso enseñanza-aprendizaje se lleve a cabo mediante la abstracción. En este proceso se da por hecho lo que ya está comprobado, y el aprendiz no recorre todas las etapas propias del conocimiento, dejando de lado la observación y la experimentación.

Ensayar un modelo real, el cual fue diseñado usando unos conocimientos abstractos, crea conciencia de que lo aprendido es aplicable, despierta sentimientos hacia el verdadero comportamiento de la estructura y compromete la creatividad para lograr medir lo que se quiere.

En estructuras, todo lo que se plantea como una observación o teoría se ensaya. Leonardo da Vinci (1452-1519), quien fue quizás el primer hombre que aplicó la estática para encontrar las fuerzas que actúan en miembros estructurales y en realizar ensayos para determinar la resistencia de materiales estructurales, basaba sus conocimientos en la experimentación. Una de sus inquietudes era poder determinar la carga máxima que resistía un alambre de hierro. Él planteó que lo que soportaba el alambre

dependía de su longitud; para comprobarlo cargó varios alambres de diferente longitud llevándolos hasta la falla para, finalmente, determinar alguna relación entre la longitud y la carga aguantada.

De la misma manera, las recomendaciones de diseño de los códigos de estructuras tienen su fundamento en los resultados de ensayos de laboratorio y en las experiencias de construcciones reales. Con estas especificaciones se pretende que los errores que se han cometido no vuelvan a repetirse. Pero, ¿cómo nos percatamos de estos errores si lo único que tenemos es una recomendación de diseño?

De ahí la importancia de construir un modelo que represente la estructura, por ejemplo, un puente sencillo. Por medio de la mecánica clásica (newtoniana) aplicada a las estructuras obtenemos las pautas para el análisis y diseño del modelo que, llevadas a la realidad, se pueden comprobar en un ensayo; en el presente caso se hace a manera de concurso para motivar aún más el aprendizaje. Para completar el método natural de aprendizaje, en este artículo se exponen algunas conclusiones sobre los modelos utilizados en las cuatro versiones del concurso y se dan algunas recomendaciones para los futuros concursantes.

# 2. SISTEMAS ESTRUCTURALES BÁSICOS PARA PUENTES Y SU FORMA DE FALLA

Se entiende por sistema estructural el ensamble de elementos para formar un cuerpo único y cuyo objetivo es dar soporte a una obra civil. El tipo de elementos ensamblados y la forma como se ensamblan definen el comportamiento final de una estructura.

En los puentes generalmente se distinguen dos sistemas estructurales principales: la superestructura y la subestructura. La superestructura está constituida por un tablero que recibe directamente la carga y por un sistema de transmisión de ésta a la subestructura, la cual se encarga de llevarla al suelo.



Los puentes se clasifican, de acuerdo con el sistema estructural en: puentes de vigas longitudinales, puentes de arco, puentes colgantes o suspendidos, puentes atirantados y puentes en voladizo. Cualquiera que sea el sistema estructural seleccionado, siempre se debe pensar en el recorrido de la car-

ga impuesta desde su punto de aplicación hasta la fundación o cimentación. Si comparamos la carga con agua esparcida sobre el tablero del puente, los elementos estructurales representarían los canales para llevar el agua hasta un recipiente final que es el suelo. Mientras más recorrido tenga la carga an-

La carga actúa sobre el tablero, este la transmite a las vigas transversales y estas a las longitudinales. La carga actúa de forma ortogonal al sistema tablero-vigas

Vigas

Vigas

longitudinales

Figura 1. Entramado de vigas transversales y longitudinales en un puente de vigas

tes de llegar a su destino final más costosa es la estructura, ya que se utiliza un mayor número de elementos. En un buen sistema estructural el flujo de carga es rápido hacia la cimentación.

Los puentes de arcos y vigas son los más sencillos estructuralmente, puesto que no necesitan de

otros elementos para transmitir la carga a la subestructura.

# 2.1 Puentes de vigas

Las vigas son elementos que trabajan a flexión y a cortante o cizalladura cuando se someten a cargas perpendiculares a su plano.

En los puentes construidos con vigas el flujo de carga pasa del tablero a unas vigas secundarias transversales y de éstas a las vigas longitudinales principales, que se apoyan en los estribos o pórticos (véase figura 1). pequeñas, hasta 30 ó 40 m; para luces más grandes, se recomienda usar los otros sistemas estructurales que, como se verá, comprometen más la cimentación y el suelo (véase figura 2).

Una vez la carga es transmitida por las vigas longitudinales principales a los apoyos, se genera en

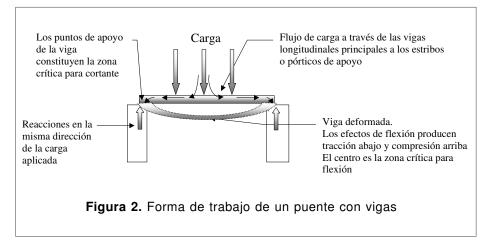
estos una reacción igual a la carga aplicada, es decir,

la viga no necesita de reacciones extras para poder

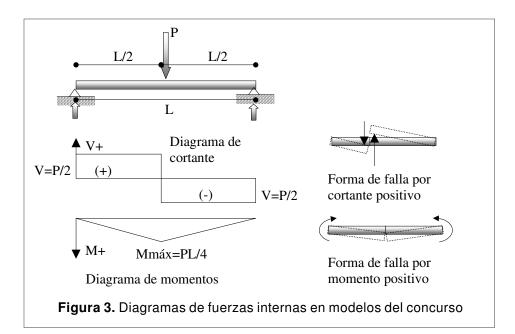
trabajar a flexión y a cortante. Los puentes de vigas

constituyen una solución económica para salvar luces

Los efectos de flexión y cortante corresponden a las fuerzas internas desarrolladas en los ele-



mentos. Para el caso particular del concurso de puentes la carga aplicada corresponde a una carga central; despreciando el efecto del peso propio, las fuerzas internas son las que muestra la figura 3.



Las vigas se pueden construir de alma llena (compacta) o en celosía (cercha). En la figura 4 se muestra la distribución de esfuerzos internos según la composición de la viga.

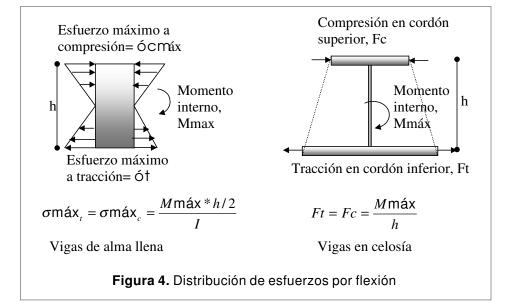
2.1.1 Vigas de alma llena. En este tipo de elementos el esfuerzo normal por flexión es inversamente proporcional al momento de inercia de la sección (véase figura 4). El momento de inercia es una propie-

dad geométrica que expresa qué tan alejada se encuentra el área de un eje dado. De acuerdo con la distribución de esfuerzos internos producidos por los efectos de flexión, sería más recomendable usar inercias grandes para disponer mayor área en los puntos de mayor esfuerzo. Lo ideal es obtener esfuerzos mínimos con la mínima área posible (poco peso) y esto se logra,

por ejemplo, usando vigas de sección en I. Si el esfuerzo normal interno por flexión es mayor que el máximo esfuerzo resistido por el material, tanto a compresión como a tracción, la viga fallará por flexión presentando rotura en la zona de tracción y aplastamiento en la zona de compresión. En el caso de que los esfuerzos internos no superen la resistencia del material, se podría presentar falla por pan-

deo de la zona comprimida. El pandeo depende directamente de la relación de esbeltez, la cual se calcula con la longitud libre del elemento (sin arriostramientos o apoyos laterales) sobre el radio de giro de la

sección transversal ( $\sqrt{I/A}$ ). La forma de controlar el pandeo sería disminuir la longitud libre o aumentar el radio de giro; en la práctica se opta por la primera opción, uniendo la viga al tablero o por medio de





elementos adicionales rigidizadores de la zona a compresión.

La distribución del esfuerzo cortante interno es inversamente proporcional al momento de inercia y al ancho de la sección transversal. Para una sección rectangular el esfuerzo máximo se presenta en el eje neutro de la sección (véase referencia 2). Simplificando la ecuación de cortante, el esfuerzo cortante promedio es inversamente proporcional al área de la sección. Si el esfuerzo interno es mayor que el esfuerzo resistido por el material a cortante, la sección fallará presentando grietas diagonales.

Falla en puentes con vigas de alma llena:



Deflexión en un puente de vigas. Se observa claramente el sistema de transmisión de carga a los apoyos. El material usado en estas vigas fue muy elástico.



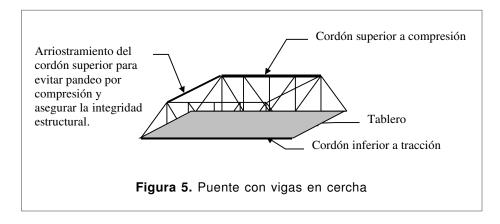
Puente de viga cajón. Note que se reduce la sección antes de llegar a los apoyos, por lo tanto, la resistencia a cortante en ese punto es mínima.



Falla por flexión en puente con vigas de sección constante hasta los apoyos. Las vigas se reforzaron con hilo de zapatero adherido con pega en su extremo interior. Debido a la presencia de la pega, la falla fue dúctil, es decir, se presentaron grandes deformaciones antes de presentar rotura.



Falla por flexión. Rotura de las vigas en su parte inferior, en la zona de aplicación de la carga. La carpeta de rodadura ayudó a la zona a compresión. 2.1.2 Vigas en celosía. Las vigas en celosía o en cerchas están compuestas por elementos rectos y esbeltos unidos entre sí en sus extremos por medio de conexiones tipo articulación. El ensamblaje es tal que en el interior de la cercha se pueden identificar figuras estructu-

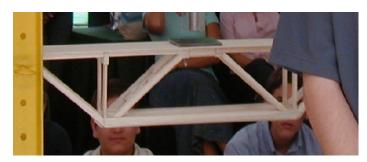


ralmente estables como los triángulos. Debido al tipo de unión de los elementos en sus extremos, estos sólo trabajan a carga axial. En este tipo de estructuras, el momento interno es soportado por el efecto de par de fuerzas entre el cordón superior (compresión) e inferior (tracción) de la cercha. A mayor distancia entre los dos cordones, menores serán los esfuerzos axiales en ellos (véanse figuras 3 y 4). Los efectos de cortante son soportados por tracción o

por compresión en las diagonales de la cercha dependiendo de su inclinación.

### Fallas en los puentes con cerchas:

La falla más común en vigas en cercha se presenta por las conexiones en los nudos. Si las conexiones trabajan adecuadamente, entonces la falla se puede presentar por rotura de los elementos a tracción y pandeo en los elementos a compresión.



Sistema estructural de cercha inferior. La carga es recibida por el tablero apuntalado en las diagonales.

Sistema mal estructurado. La cercha superior no alcanza a trabajar por el pandeo del elemento a compresión. La cercha inferior compromete el tablero a compresión.







Falla en las conexiones, los elementos no alcanzan a desarrollar su resistencia máxima.



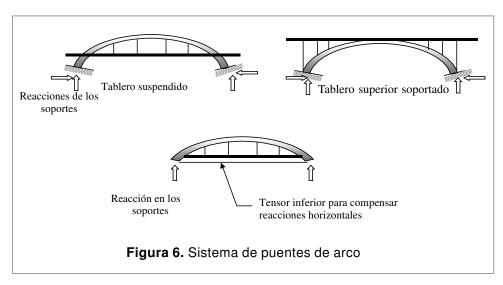
Falla por falta de elementos transversales que transmitan la carga a las cerchas. No se construye un sistema estructural adecuado en el que se logre un trabajo de conjunto.

# 2.2 Puentes de arco

El sistema estructural principal está constituido por dos arcos laterales o por un arco central inferior. De acuerdo con la posición de la vía se clasifica en puente de vía superior y puente de vía inferior. En el puente de vía superior la

transmisión de la carga al arco puede ser por medio de puntales, columnas o muros; y en el puente de vía inferior, por medio de tirantes verticales.

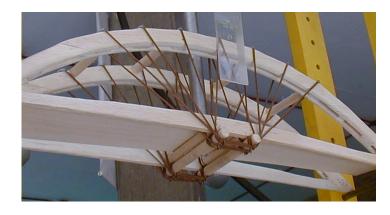
El arco como elemento estructural trabaja netamente a compresión. Las reacciones en sus



apoyos, además de soportar la carga vertical aplicada, deben ejercer fuerzas horizontales para ayudar al arco a mantener su forma curva. Si los soportes no pueden brindar esta reacción, se puede recurrir a un elemento inferior complementario que actuaría como tirante (tracción), según muestra la figura 6. Los arcos pueden ser de sección compacta o de sección no compacta tipo cercha.

Fallas en los puentes de arco:

La fallas más comunes en estos puentes son por pandeo a compresión en el arco o por deslizamiento en sus soportes, lo que ocasiona la rotura del arco. Para evitar la falla por pandeo se puede contar con elementos arriostradores.



Arco con tablero suspendido. Sistema bien estructurado. Se cuenta con dos elementos horizontales que trabajan como tirantes para mantener la forma del arco. Se dispuso de vigas transversales en el punto de aplicación de la carga para transmitir la carga a los elementos estructurales. Los cables están orientados al punto de aplicación de la carga.



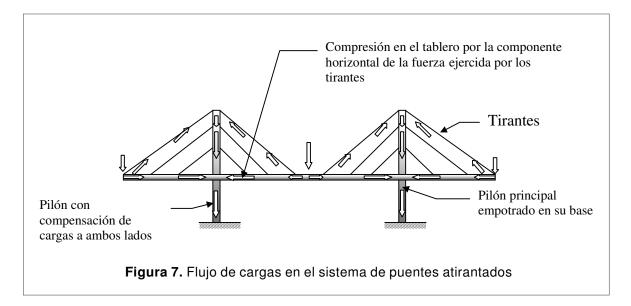
Pandeo de arcos por falta de arriostramiento. Falla en la conexión con el elemento inferior que sirve de tirante.



Sistema de arco invertido. Tensores en la parte inferior y tablero que trabaja a compresión.



### 2.3 Puentes atirantados

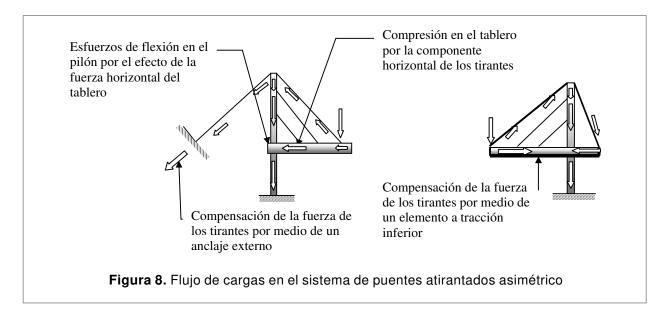


El sistema estructural de este tipo de puentes consta de un tablero que trabaja a flexocompresión, unos tirantes que soportan el tablero y transmiten la carga a un pilón, y un pilón que lleva las cargas hasta la fundación (ver figuras 7 y 8).

### Falla de puentes atirantados:

Como sistema estructural completo, los puentes atirantados pueden fallar por: inestabilidad

general causada por rotación del pilón en su base; por poca resistencia del pilón, ya sea a flexión, compresión o cortante o por falla del tablero a compresión, ya sea por aplastamiento o por pandeo de los elementos. Otras fallas locales pueden presentarse por rompimiento de los tirantes, punzonamiento y cortante en los puntos de anclaje de los tirantes en el tablero y en el pilón; o por falla local del tablero por flexión o cortante.



Para el caso particular del concurso de puentes, no se cuenta con apoyos fijos o empotrados para el pilón, por tanto, los modelos planteados con este sistema no trabajan como tal a menos que se provea un cable inferior de compensación. Los modelos que han utilizado este sistema han fallado por pandeo del tablero, punzonamiento del tablero, deflexión excesiva (los tirantes de cáñamo son muy elásticos) y cizalladura en el tablero o pilón en las conexiones de los cables.



Puente con un mal sistema estructural. Los tirantes y pilones no ejercen ningún tipo de fuerza, pues no tienen reacción externa o cable de compensación.



Puente atirantado con cable inferior a tracción. Los pilones deberían estar apoyados en el soporte externo y no encima del tablero.

### 2.4 Puentes suspendidos

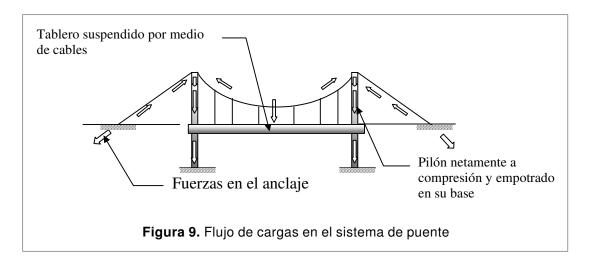
En este sistema, el tablero se cuelga de dos cables laterales que atraviesan toda la luz suspendidos de dos columnas o pilones principales. A diferencia del puente atirantado, en este tipo de estructura, el tablero no se somete a ninguna fuerza adicional a la carga de servicio.

Para compensar las fuerzas horizontales generadas por el cable en los pilones y evitar grandes esfuerzos de flexión, se disponen anclajes externos. Los puentes colgantes o suspendidos son una buena solución estructural para salvar grandes luces. Como ejemplo de estas estructuras se puede mencionar el puente de Occidente en Antioquia.

Para la estabilidad general de la estructura se requiere un soporte fijo en la base del pilón, el cual exige fundaciones y suelo adecuados. Se puede decir que el pilón, su fundación y el anclaje son el corazón de estos puentes y constituyen el ítem más costoso dentro de todo el sistema. La falla de estas estructuras se puede presentar por su excesiva flexibilidad tanto para cargas verticales como horizontales, sísmicas y de viento.

### Fallas en los puentes suspendidos:

De igual manera que en los puentes atirantados, plantear este sistema estructural en el





concurso de puentes requiere el uso de un tirante inferior. Los modelos construidos con sistema de puente colgante sin tirante de compensación fallan por rotación del pilón hacia el centro haciendo que el tablero trabaje como viga simple. Para sistemas con tirante de compensación, la falla se presenta por deflexión excesiva, mal funcionamiento del tirante y compresión del tablero por reacción del tirante inferior, entre otros.

## 2.5 Otras formas generales de falla

Unos modelos del concurso de puentes planteados con sistemas estructurales diferentes a los mencionados han presentado fallas por un mal ensamblaje de los elementos, por una mala concepción del sistema estructural, por falta de continuidad de los elementos recolectores y conductores de la carga hacia los apoyos, por asimetrías grandes y por falla local de punzonamiento en el punto de aplicación de la carga.

Los puentes construidos con guadua presentan especialmente una gran capacidad de deformación sin mostrar falla aparente de sus materiales; este fenómeno en estructuras se llama ductilidad. En estos puentes la falla estaba determinada por deflexión excesiva. Otros puentes dúctiles fueron aquellos que utilizaron cuerdas en sus conexiones. Las cuerdas no restringen del todo el movimiento de un elemento con respecto al otro, lo que hace que el puente falle por deformación.

# 3. DESCRIPCIÓN Y EVOLUCIÓN DEL CONCURSO DE PUENTES EIA

El concurso de puentes nació por iniciativa del estudiante de ingeniería civil Luis Alfredo Turizo al enterarse de eventos similares que se realizaban en otras universidades nacionales y extranjeras. Su idea fue acogida por el Área de Estructuras y empezó el concurso de puentes EIA en el año 2000.

Cada edición del concurso ha contado con un grupo organizador compuesto por estudiantes de la carrera de ingeniería civil y docentes del Área de Estructuras. El concurso consiste en diseñar y construir un modelo de un puente a escala, para salvar una luz libre dada, con apoyos simples en sus extremos. El modelo de puente debe resistir la mayor carga central con el menor peso posible.

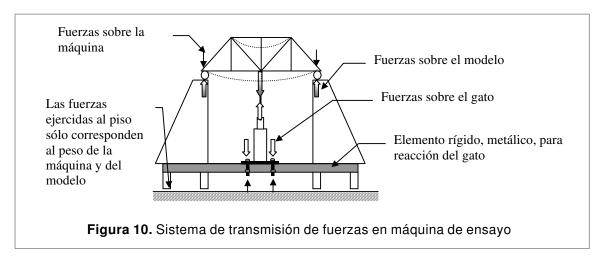
Cada año las reglas del concurso se han ido modificando según las experiencias de los concursos anteriores. En todas las ediciones se han mantenido tres criterios básicos de calificación: la relación entre la fuerza resistida hasta una deflexión máxima de 2 cm o hasta la rotura de alguno de los elementos y el peso del modelo; el peso total del modelo y la estética. En las últimas ediciones se incluyó dentro de la calificación el acertar o no con el tipo y lugar de la falla del modelo.

En la primera edición del concurso el modelo correspondía a un puente que debía reemplazar un puente rural derribado. En esa ocasión se le dio importancia a la solución estructural teniendo en cuenta que el puente debía ser de fácil construcción. No se plantearon restricciones en cuanto al material para utilizar, pero sí se definían la longitud, la anchura y el peso máximo. La creatividad en cuanto a los materiales usados fue exuberante y esto tergiversó lo que realmente se quería medir. Los puentes de materiales más resistentes y más livianos, como el aluminio, soportaron una carga mayor, sin que esto signifique un mejor sistema estructural.

Para el ensayo de carga se utilizó un gato manual haciendo reacción en una losa de concreto y se midió la carga de falla con un anillo de deformación. Varios modelos sobrepasaron la carga máxima del anillo obligando a los organizadores a modificar algunos criterios de calificación.

Para el siguiente año, con el objetivo de subsanar los problemas del ensayo de carga del año 2000 y con el apoyo de la empresa Conconcreto, se construyó una estructura que permitiera realizar el ensayo sin ningún tipo de reacción externa (máquina con autorreacción), se contó con un gato hidráulico para la aplicación de la carga y con un transductor de presión para la lectura de la presión en el gato (ver figura 10).

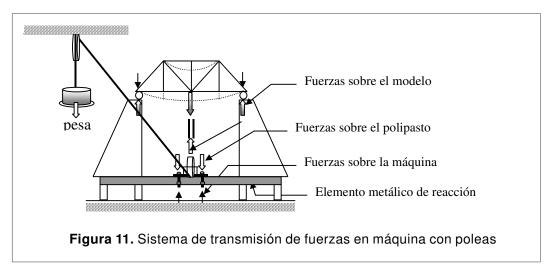
El diseño de la máquina fue realizado por estudiantes miembros del comité organizador del concurso. En el año 2002 se realizó el ensayo con elementos mecánicos que permitieran tener una concepción más real de una carga aplicada. Se utilizó la misma máquina del año 2001 reemplazando el gato hidráulico y el transductor de presión por un sistema mecánico compuesto por un juego de poleas, que permitía multiplicar la carga aplicada y transmitirla a los modelos, un cable y un juego de pesas. En vista de



Para incentivar el uso de otros sistemas estructurales se modificaron algunas reglas de concurso: se prohibió el uso de materiales metálicos, lo que condujo a que los participantes emplearan básicamente plástico y madera; se incrementó la distancia entre apoyos a 66 cm y se limitaron las dimensiones de las secciones, sobre todo la altura de las vigas.

que la carga se aplicaba de una forma discontinua (cada pesa significa un brinco en la carga aplicada al puente), se dispuso de un balde con arena para el ajuste final de la carga resistida por el puente.

El experimentar con este montaje permitió comprobar que la fricción es un efecto dificil de





controlar, causante de errores en las medidas y que aplicar la carga en forma gradual pero discontinua incrementa la fuerza de falla en los modelos.

Con el fin de igualar las condiciones de todos los modelos, los puentes debían utilizar los mismos materiales: madera de balso, cáñamo o hilo de zapatero y pega de madera. Con el objetivo de obtener un uso más eficiente de los elementos, se limitaron aún las dimensiones. Aunque las limitaciones de material y de tamaño de los elementos disminuían aparentemente la resistencia de los modelos, los participantes lograron perfeccionar sus propuestas para un aumento apreciable en las cargas soportadas.

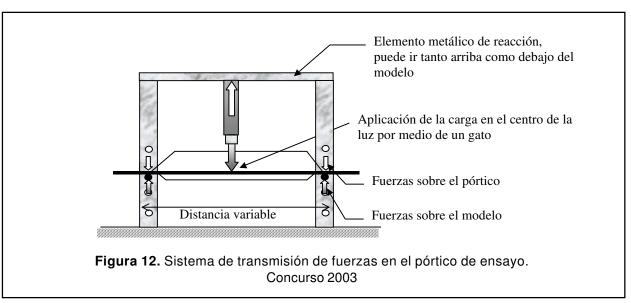
Buscando una mayor participación de los estudiantes de los primeros años, se crearon dos categorías: la básica para estudiantes que no hayan cursado análisis de estructuras y la avanzada para los que sí. La categoría avanzada debía entregar memorias de cálculo con la descripción de la falla esperada.

Para el año 2003 se construyó un pórtico de ensayo de estructura metálica, más versátil que la máquina anterior, de tal manera que permitiera graduar fácilmente las medidas de anchura, longitud y altura y que permitiera aplicar tanto fuerza de tiro como de empuje sobre el modelo (ver figura 12).

El ajuste de las reglas siempre ha tenido como objetivo lograr sistemas estructurales más eficientes, económicos y factibles de construir. El resultado de estos ajustes se presenta en las siguientes especificaciones de construcción:

### Dimensiones del modelo del puente:

- Altura total: máximo 30 cm medida desde la parte inferior del modelo hasta su parte superior.
- Altura medida desde la parte inferior hasta la carpeta de rodadura: 15 cm. Se permiten sistemas estructurales tanto por encima como por debajo de la carpeta de rodadura, siempre y cuando la carpeta no quede a más de 2 cm del nivel de los apoyos (con esta norma se pretende limitar la altura de las vigas principales).
- Altura libre por encima de la carpeta de rodadura: mínimo 13 cm para permitir el paso de vehículos en toda la longitud.
- Ancho del modelo: máximo 17 cm, mínimo 12 cm, de los cuales 10 cm deben quedar completamente libres de elementos para permitir el paso de vehículos.
- Longitud: El modelo del puente debe tener una longitud mínima de 82 cm. La luz libre entre



apoyos es de 78 cm. La longitud máxima del puente es de 102 cm dando posibilidad de incluir voladizos de 10 cm a cada lado.

#### Dimensiones de los elementos estructurales:

• Ningún elemento del sistema estructural puede tener una dimensión transversal mayor que 3,0 cm y un área máxima de 2 cm². Cuando se unen dos elementos para que trabajen como uno solo, se mantiene esta limitación de dimensiones. Si se combinan dos piezas, para que estas sean consideradas como elementos separados debe asegurarse entre ellas una distancia mínima de 1 mm y los puntos de contacto o pegas entre ellas deben espaciarse a más de 5 cm.

Se permiten, como máximo, tres puntos de contacto de la estructura con cada apoyo. El ancho de estos contactos se rige por el ancho del elemento estructural que transmite la carga al apoyo (esta regla limita el uso de una sola pieza compacta como sistema estructural).

Peso máximo: 3,92 N (0,40 kg-f)

# 4. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS GANADORES

### 4.1 Concurso año 2000

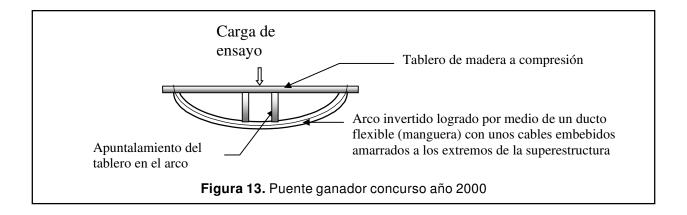
El puente ganador consistía en un arco invertido. Este modelo aprovecha las características

mecánicas de los materiales formando un sistema estructural compuesto; los cables trabajan a tracción en la parte inferior y el tablero de madera rígido trabaja a compresión en la parte superior. La transferencia de fuerzas se hace a través de los elementos rígidos de apuntalamiento. La falla del modelo se dio por cortante del tablero en las zonas de apoyo. Este modelo no fue el que más carga resistió, pero combinando los otros criterios de calificación se hizo merecedor al premio (véase figura 13).

El segundo puesto fue para un puente con cuatro vigas longitudinales de aluminio. Para cuidar el peso se usaron perfiles con sección en "I". Con este modelo se corroboró que las buenas soluciones no siempre son las más complicadas, siempre y cuando se tengan conocimientos de resistencia de materiales.

### 4.2 Concurso año 2001

La estructura del puente ganador consistía en dos arcos laterales de madera que soportan el tablero por medio de tirantes verticales. En este modelo se suple la restricción lateral del apoyo con un elemento inferior, también de madera, que une los dos extremos de cada arco. Este elemento se convierte en la pieza clave del puente, ya que recibe la carga del tablero, aguanta la tracción tanto debida a la flexión de la sección compuesta arco-viga longitudinal como de las fuerzas de restricción para que los arcos no se abran. Para lograr el efecto combinado del elemento arco y viga longitudinal se usaron tirantes verticales





de hilo de cáñamo. Además de haber sido uno de los puentes más resistentes, fue un puente novedoso y con estética.

El segundo puesto correspondió de nuevo a un puente con vigas longitudinales. En vista de que se limitaba el uso de secciones en "I", se propuso una solución con vigas rectangulares demostrando ser uno de los puentes más resistentes.



Ganador



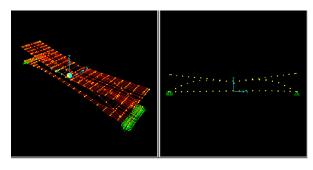
2° puesto

### 4.3 Concurso año 2002

Ese año el puente ganador en la categoría básica volvió a ser un arco. En este caso teníamos un modelo de balso donde el arco se logró usando la técnica de madera laminada y prensada. En su parte inferior contaba con elementos horizontales de madera de balso que le servían de tirantes. El tablero consistía en una lámina de balso. Distaba de ser un modelo de puente real, ya que el tablero apenas se unía al sistema estructural en la mitad de la luz dejando que sus extremos trabajaran como voladizos. El puente sólo estaba diseñado para soportar cargas centrales, lo cual era válido según las reglas del concurso.



Puente ganador en categoría básica



Modelo del puente en un programa de análisis de estructuras por elementos finitos. Se puede observar la coincidencia en la figura deformada de la estructura entre el modelo real y el del computador.

El modelo estructural muestra deformaciones grandes del tablero y deflexiones en el centro de la luz, punto de aplicación de la carga. En este mismo modelo se puede detectar que está sometido a grandes esfuerzos de tracción el elemento inferior, donde finalmente el puente mostró su debilidad.

En la categoría avanzada el modelo ganador consistía en una estructura de vigas longitudinales recubiertas en su exterior con tablas de balso que tenían una geometría que representaba la espina de un dragón. Se concluye una vez más que los puentes de vigas son una solución muy eficiente, aunque no la más estética.

### 4.4 Concurso año 2003

El puente ganador tenía un sistema estructural que trabaja como arco con tablero suspendido compuesto por elementos rectos e inclinados unidos en su extremo superior, un tablero que hacía las veces de tirante y unos elementos de transmisión de carga entre el tablero y la estructura superior. Cabe mencionar que las conexiones fueron bien trabajadas utilizando alfileres como pernos. En general la estructura se comportó bien, y la falla se presentó en la unión entre los elementos inclinados y el tablero por efecto de la fuerza horizontal generada por la acción de pandeo.



Puente ganador concurso 2003

### 5. CONCLUSIONES

El concurso de puentes nos permite comprobar que la experimentación es sólo una parte del proceso natural de aprendizaje y que no podemos dejar de lado toda una historia de conocimientos. El estudio, la planeación, el orden y la abstracción son características propias de un buen diseñador. La experimentación llevada a cabo en el concurso crea conciencia en cuanto a la importancia que se les debe dar a las teorías y conceptos básicos que rigen el comportamiento de las estructuras y que los participantes más tarde aplicarán en su vida profesional. Los errores básicos se detectan inmediatamente en el ensayo de carga, o incluso antes, lo que nos muestra la importancia de estudiar antes de hacer. Todo esto

permite concluir que para obtener un buen modelo se debe seguir el mismo procedimiento que se utiliza en el diseño de estructuras, el cual se puede resumir así:

- Concebir el sistema estructural.
- Consultar o determinar las propiedades mecánicas de los materiales para utilizar (resistencia a tracción, compresión, cortante, etc.) por medio de ensayos simples de una sección compacta.
- Con la luz de diseño, determinar el cortante y el momento máximo en función de una carga P aplicada en el centro de la luz.
- Con unas dimensiones tentativas calcular los esfuerzos máximos de flexión, axial y cortante en los elementos en función de P.
- Comparar los esfuerzos máximos en función de P con la resistencia de la sección, encontrar la carga P que soportaría la estructura y determinar cuál de los elementos falla primero.
- Redimensionar los elementos y calcular de nuevo P.
- Construir una gráfica que relacione P y peso, y obtener el punto máximo de esta gráfica, el cual corresponde a la sección óptima.
- Verificar que los elementos a compresión se encuentren arriostrados para evitar la falla por pandeo.
- Revisar las uniones y diseñarlas con un factor de seguridad mayor que los elementos para que no constituyan un punto débil.
- Explorar la posibilidad de mejorar la resistencia por medio de refuerzos externos.

Al principio de este trabajo se presentó un análisis de las formas típicas de falla de los diferentes modelos según el sistema estructural, permitiendo comprobar que se puede mejorar si se aprende de los errores cometidos.



En cuanto a la parte constructiva el concurso enfrenta a los participantes a plasmar en un plano una idea, leer del plano las dimensiones y posición de elementos, ensamblar tridimensionalmente elementos, definir un tipo de conexión para usar, etc., lo que lleva a que cada vez los modelos presentados sean más estructurados y eficientes.

Adicionalmente, el concurso ha creado un espacio de lúdica y ha propiciado la integración en un objetivo común de los estudiantes de diferentes carreras.

### NOMENCLATURA:

A: área de la sección

I: momento de inercia de una sección:

$$Ix = \int_{A} y^2 dA$$

M: momento

h: altura de la sección

P: carga central

σ: esfuerzo por flexión, fuerza por unidad de área

 $\tau$ : esfuerzo cortante promedio:

$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

Q: Momento de primer orden del área:

$$Q = \int_A y \, dA$$

b: anchura de la sección

V: fuerza cortante interna

Ft = fuerza de tracción en el cordón inferior de una viga en celosía o en una cercha:

$$Ft = \frac{M}{h}$$

## **BIBLIOGRAFÍA**

- TIMOSHENKO, Stephen P. History of strength of materials. New York: McGraw-Hill, 1953.
- 2 BEDFORD, Anthony y LIECHTI, Kenneth. Mecánica de materiales. Bogotá: Pearson Educación de Colombia, 2002. 1ª edición.
- Asociación de Ingeniería Sísmica, AIS. Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente, NSR-98.
- 4. www.brantacan.co.uk/bridgeefs.htm
- 5. http://estructuras.eia.edu.co
- 6 www.qro.itesm.mx/departamentos/imi/eventos/puentes2000.htm
- 7. www.bridgesite.com/