

El puente Doménico Parma (Colombia): adaptación de innovaciones en procesos constructivos de estructuras de cables

Camilo Villate Matiz

Doménico Parma Marré nació en Chiavari, Italia, en 1920. Se formó como ingeniero civil en la Universidad de Génova donde obtuvo su licenciatura en 1945; un año más tarde emigró a Colombia en compañía de su esposa. Ya en Bogotá, se desempeñó como ingeniero jefe de la división encargada de la revisión de planos estructurales para el municipio de Bogotá desde 1947 y en 1949 se vinculó a la firma «Cuéllar, Serrano & Gómez - CUSEGO», en donde dirigió la oficina de cálculo estructural (Varini 2004). Desde esta importante empresa constructora, Parma desarrolló el sistema de construcción de forjados denominado «reticular celulado» o «RetCel» con el que se construyeron numerosas edificaciones en el país por un lapso de 50 años (Vargas 2012, Cortés y Primmer 2013). De esta etapa laboral se destacan varios proyectos para edificios en altura: hospital San Juan de Dios [1949–50], Hotel Tequendama [1951–52], Centro Urbano Antonio Nariño [1952], hospital San Pedro Claver [1955] y edificio Ecopetrol [1957], todos ellos en Bogotá. De otra escala, pero igualmente paradigmáticos, son sus diseños estructurales para la urbanización La Soledad [1952] y el aeropuerto internacional Eldorado [1959].

A partir de 1962 estableció su propia firma: «Doménico Parma Asociados Ltda. Ingenieros Consultores» a la cual se vincularon sus compatriotas Giorgio Sivori [ingeniero] y Camilo Zorio [dibujante]. Desde su propio despacho estableció fructíferas relaciones con importantes empresas constructoras colombianas entre las que se contaron «Esguerra, Sáenz, Urdaneta

& Samper», «Pizano, Pradilla & Caro» y «Obregón & Valenzuela», aunque sin llegar a descuidar sus fuertes vínculos con «CUSEGO» (Vargas 2008). De este periodo son reconocidos los cálculos estructurales realizados para varios edificios (Villate 2008): sede del Banco Central Hipotecario [1962–64], Avianca [1965], Torre Davivienda [1965], Residencias El Parque [1965], Seguros Tequendama [1967] y Telecom [1972], a los que se sumaron los que hiciera para el traslado del edificio Cudecom [1973–74], este último reseñado por Páez (1975).

En el ámbito internacional fue reconocido por tres de sus patentes: «Machine for making precast concrete products» [N° 3196513 de 1963], «System for post-stressing concrete slabs, beams or other structures» [N° 3422586 de 1969] y «Machine for making metal tubes» [N° 3606779 de 1969], todas ellas registradas en Estados Unidos (Mayor 2005). Adicionalmente, fue miembro suplente en el «American Concrete Institute» y conferencista invitado en universidades de Estados Unidos y América Latina.

Además de adelantar los cálculos estructurales para numerosos edificios, Doménico Parma también lo hizo para puentes de hormigón, entre los que se destacan el de Cambao sobre el río Magdalena [en servicio desde 1986], el puente sobre el río Chinchiná [en servicio desde 1991] y el puente de Anacaro, sobre el río Cauca [en servicio también desde 1991], estos dos últimos para la firma «Conconcreto». A lo anterior se suma su participación en el equipo a cargo de la construcción del puente «Alfonso López Pu-

marejo», sobre el río Magdalena, en cercanías de Barranquilla, diseñado por Ricardo Morandi [en servicio desde 1974] el cual estaba compuesto por un sistema de 26 luces típicas simplemente apoyadas y un tramo principal continuo de tres luces [96,5 m – 140 m y 69,5 m] que se resolvía mediante sendas vigas de sección en «I», pretensadas y prefabricadas.

A su fallecimiento en Bogotá en 1989 –y cuando estaba al frente de la supervisión de la construcción del puente del río Chinchiná, bautizado póstumamente con su nombre como reconocimiento a su trabajo–, Parma sumaba casi 1600 proyectos desarrollados en Colombia y ocho países más [Ecuador, Venezuela y México, entre otros] de los cuales unos 1400 correspondían a cálculos de estructuras civiles, 68 puentes, 20 grúas, 23 máquinas de diversa índole al servicio de la construcción, 17 plantas industriales, 2 libros (Parma 1955; Parma 1976) y 13 estudios teórico experimentales.

EL PUENTE SOBRE EL RÍO CHINCHINÁ: GÉNESIS DEL PROYECTO

En noviembre de 1985 la erupción del volcán Nevado del Ruiz generó una fuerte avalancha que, tomando el curso del río Chinchiná –entre otros–, destruyó a su paso el puente construido sobre él y que hacía parte de la principal vía de comunicación entre las ciudades de Pereira y Manizales. Rápidamente el Ministerio de Obras Públicas convocó una licitación a la que presentaron sus propuestas cuatro firmas, siendo adjudicada la obra a «Concreto» con la cual Parma ya había tenido algunas experiencias profesionales previas.

Las tareas de diseño empezaron en enero de 1986 con una visita al sitio en la que fue posible reconocer las dificultades que representaba el perfil geográfico del lugar escogido para un nuevo puente, así como las complejas condiciones naturales y climáticas del entorno. Adicionalmente, el estudio de suelos advertía de la presencia de escorrentías de agua a escasa profundidad y bajas consistencias superficiales propias de terrenos sedimentarios, por lo que se recomendaban sistemas de cimentación profundos capaces de llegar 22 m por debajo del nivel previsible para otros más convencionales (Orozco 1986).

En marzo de ese mismo año, Doménico Parma contaba ya con cuatro anteproyectos del puente que

presentó a la firma «Concreto», y aunque no es posible precisar el orden en que cada uno de ellos fue elaborado, sí es fácil advertir que todos respondían a un proceso de búsqueda formal y constructiva en procura de minimizar los costos y reducir al máximo el número de pilas sobre un terreno de difíciles condiciones geotécnicas. Así, la primera propuesta se desarrollaba en torno a una solución que combinaba un arco metálico de 120 m de luz que salvaba el cauce del río y sus orillas inundables, con un conjunto de tres pilas que soportaban igual número de tramos rectos resueltos a partir del uso de vigas de hormigón tanto en voladizo –de 5,5 m a cada lado con respecto al eje del apoyo–, como simplemente apoyadas, de 35 m cada una (figura 1).

Una segunda propuesta (figura 2) concebía un sistema de dos voladizos balanceados con viga tipo cajón de 50 m de longitud cada uno, que arrancaban desde una torre central y en cuyos extremos libres se apoyaban sendos tramos suspendidos.

Un tercer anteproyecto se orientaba hacia la idea de la estructura colgante con mástil único que se situaba en uno de los extremos del puente de tal manera que en la orilla opuesta las catenarias aparecían ancladas directamente en la roca del talud existente, en una clara manera de conservar la economía de las obras y aprovechar al máximo las condiciones del lugar (figura 3).

Finalmente, el último de los anteproyectos firmado por Parma en marzo de 1986, deja ver una interesan-

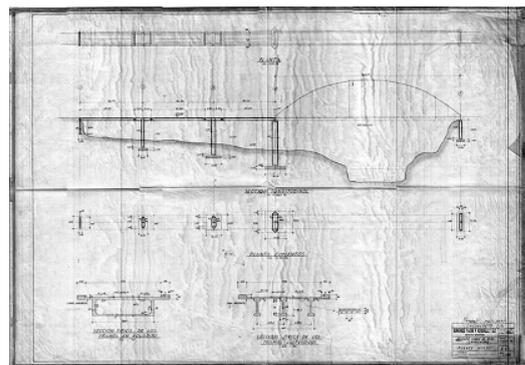


Figura 1
Anteproyecto de solución convencional con tramos rectos apoyados y arco metálico de gran luz. Fuente: Archivo Parma, Universidad de los Andes.

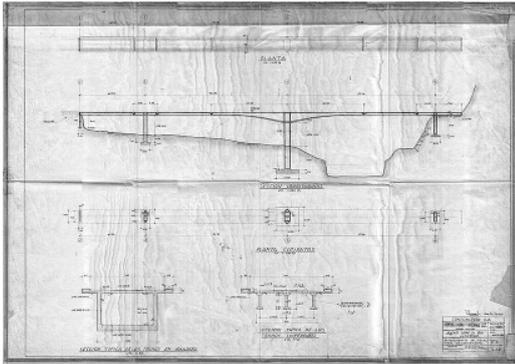


Figura 2
Anteproyecto de voladizos balanceados. Fuente: Archivo Parma, Universidad de los Andes.

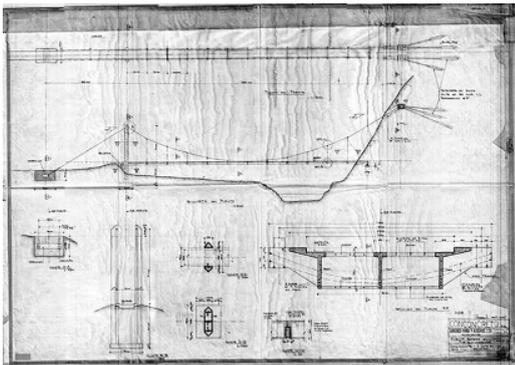


Figura 3
Anteproyecto de puente tipo colgante con mástil único en un extremo y anclaje opuesto en roca. Fuente: Archivo Parma, Universidad de los Andes.

te solución formal y constructiva, síntesis de las anteriores: un mástil único de 60 m de altura situado en el centro del claro que soporta mediante un par de catenarias dos tramos de calzada, una a cada lado y de 120 m de longitud cada una. El mástil –que soporta el 85% de las cargas muertas–, mantiene una sección hexagonal desde sus cimientos hasta el punto de encuentro con el tablero para convertirse desde allí en dos potentes pilares de planta triangular hueca de 35 m de altura sin ningún tipo de arrostramiento, adoptando la forma de un diapasón.

En lo más alto de estos pilares se ubica el galápagos sobre el cual pasan las catenarias, de tal manera

que sus extremos opuestos quedan empotrados en los macizos situados en cada orilla del río. De cada una de las catenarias se sujetan 10 pendolones que soportan igual número de vigas transversales, separadas entre sí por una distancia de 20,85 m. Sobre estas vigas, en sentido longitudinal, se apoyan vigas pos-tensadas de hormigón en forma de «I» que conjuntamente forman una calzada continua de casi 250 m de largo y 9 m de ancho. Se trataba de una solución atrevida para el país, en el que hasta entonces nunca se había levantado una estructura similar.

Pero además del mástil único, un detalle particular convertía esta propuesta en algo singular: en la mitad de cada tramo próxima al mástil, el tablero colgaba convencionalmente de las catenarias mediante pendolones a tracción, pero en la segunda mitad próxima a cada enfoque, las catenarias pasaban por debajo del tablero de tal manera que los pendolones asumían esfuerzos de compresión y los torones entraban a los macizos de anclaje con inclinación invertida, es decir, de abajo hacia arriba. El hecho de que el tablero quedase claramente confinado entre las catenarias sujetas al juego de vigas transversales, seguramente reducía el rango de oscilaciones y permitía prescindir de sistemas de contravientos. En el margen superior derecho del plano, una nota resumía las características del proceso constructivo que debía ser desarrollado (figura 4).

El puente sobre el río Chinchiná que finalmente diseñará Doménico Parma en noviembre de 1986 adopta con gran fidelidad la última de sus propuestas

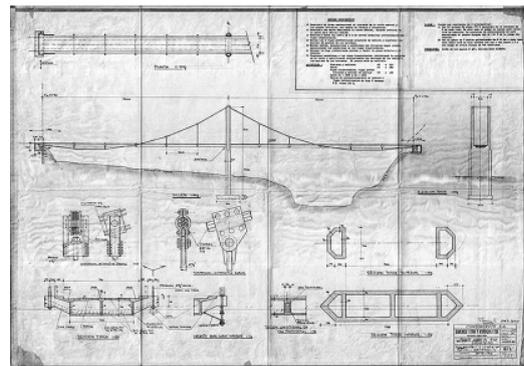


Figura 4
Anteproyecto con la solución finalmente adoptada. Fuente: Archivo Parma, Universidad de los Andes.

en la que solo se ajustan algunos aspectos de orden dimensional.

Desde el punto de vista mecánico, el puente quedaba integrado por dos sistemas independientes pero que interactuaban entre sí, por lo que ambos presentan compatibilidad de deformación. Los dos sistemas fueron denominados por Parma como «sistema pórtico» y «sistema catenaria» (figura 5). El primero estaba conformado por la torre central y las vigas de rigidez longitudinales, cumpliendo las siguientes condiciones: [a] se consideraba un apoyo empotrado en el punto «C», [b] se consideraban apoyos simples en «A» y «B» con movimiento restringido en sentido vertical, [c] existía continuidad estructural entre todos los miembros en el punto «D», [d] se contemplaba la existencia de cargas horizontales en «A» o en «E», [e] se contemplaban cargas verticales en un punto cualquiera de la luz izquierda, y [f] se tenían dos claros de igual luz «S». Por su parte, el sistema «catenaria» estaba formado por la propia catenaria más los 10 pares de pendolones en suspensión.

El cálculo estructural se desarrolló a partir del marco normativo de la AASHTO de 1997 con especial consideración a los aspectos sísmicos dadas las condiciones de la región y del país. Además, se contó con la ayuda de cuatro programas informáticos: «CATE» que suministraba la geometría de la catenaria en función de la longitud de los segmentos, las cargas en los nudos, el claro y la diferencia de nivel entre anclajes; «DEF» que suministraba las deformaciones en todos los puntos críticos del pórtico sin las catenarias; «GEO» que suministraba las nuevas coordenadas de los nudos después de haber ocurrido las

deformaciones) y «CHINA» por el cual se determinaba el cálculo general integrando las condiciones extremas como podía ser el corte de un pendolón. Fue muy probablemente la primera ocasión en Colombia donde una estructura se calculaba con ayuda de herramientas computacionales.

En este proyecto, Doménico Parma será mucho más que un simple diseñador. Desde sus inicios él siguió de cerca el desarrollo de los trabajos de construcción y se involucró con la solución de detalles que debían ser resueltos durante los meses en que le fue posible acompañar las obras, dado su fallecimiento poco tiempo antes de su inauguración en 1991.

ETAPAS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE

Las obras empezaron a mediados del año 1987 con la demolición de un conjunto de viviendas situadas en una zona que quedaría bajo el tablero del puente y que continuaba en permanente amenaza ante las crecientes del río. Una vez liberada el área y construida en sus inmediaciones una planta para la elaboración de los prefabricados de hormigón, se organizaron las obras del puente conforme a cinco etapas claramente definidas por Parma. Cada una de ellas está explicada en detalle en las Memorias de cálculo conservadas en el «Archivo Parma» de la Universidad de los Andes en Bogotá.

La etapa 1 comprendía la construcción de la subestructura y los macizos de anclaje. La cimentación de la pila central estaba formada por una zapata única situada a 10 m por debajo del nivel de la superficie existente; bajo ella se fundieron –por el sistema de anillos en concreto–, 9 *caissons* con longitudes cercanas a los 15 m de profundidad en los que también se consideró la existencia de empujes horizontales producidos por la erosión de los suelos sedimentarios propios del lugar.

La etapa 2 correspondía a la construcción de los estribos, levantados también sobre pilotes. El estribo de la margen izquierda se apoyó sobre dos *caissons* verticales de 18,5 m de altura y 3 m de diámetro; el de la margen derecha se apoyó también en un par de *caissons* pero fundidos estos de tal manera que su eje formaba un ángulo de 45° con respecto a la horizontal. Se recomendaba aquí que los cables dispuestos entre estribos y macizos debían ser tensionados después de que el hormigón alcanzara

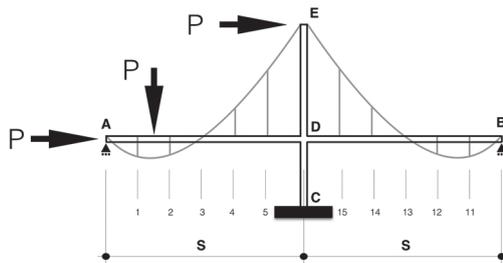


Figura 5
Abstracción de los dos sistemas estructurales del puente. En negro, el «sistema pórtico» y en gris el «sistema catenaria». Fuente: elaboración propia.

su resistencia máxima al cabo de 28 días y en ningún caso antes de que la catenaria hubiese sido colocada.

En la etapa 3 estaba prevista la erección de la torre, llevada a cabo por métodos convencionales mediante la técnica de encofrado deslizante llamada en el lugar «formaleta trepadora» (figura 6).

Para la etapa 4 se consideraba la colocación de la catenaria de tal manera que los 112 torones de $\frac{1}{2}$ " de acero de alta resistencia que la conformaban fueron previamente marcados, antes de ser situados en el vértice de la torre y fijados en los estribos; esto con el fin de lograr que con el puente en carga muerta se presentara verticalidad entre la abrazadera de la catenaria y el centro de la viga transversal correspondiente. A fin de adelantar los trabajos a lo largo de la catenaria –es decir, la colocación de abrazaderas y

pendolones–, se dispuso de una plataforma deslizante diseñada por el propio Parma (figura 7). Además, pesos muertos colgaban provisionalmente de las catenarias a fin de minimizar su movimiento basculante que ponía en peligro no solo a la seguridad de los operarios sino también a la calidad de las obras. Contrariamente a las prácticas de la época, Parma usó cables producidos en Colombia por la firma «Emcables» (Varini 2004).

La etapa 5 correspondía a la fabricación y colocación de vigas tanto transversales como longitudinales y era probablemente la más compleja de todas, en especial por la manera en que su posición final afectaba la forma misma de la catenaria y con ello todo el sistema de equilibrio del puente.

Todas las vigas fueron prefabricadas en hormigón pos-tensado. Las vigas transversales, 10 en total, tenían una longitud de 11 m y 50 cm de sección rectangular, aunque con perfil escalonado y estaban sujetas a las catenarias por un sistema de suspensión diseñado por Parma en el que se consideraron las diferencias para cuando quedaban colgadas del cable o apoyadas en él. Las vigas longitudinales fueron 36, tenían extensiones en torno a los 20,8 m y su sección era en forma de «I» con 16 cm de espesor en el alma y 62 cm de espesor en los patines; en cada uno de sus extremos estas vigas poseían una muesca a fin de facilitar su apoyo simple sobre las vigas transversales de tal manera que quedaban enfrentadas las perforaciones por donde estaba previsto que pasaran los cables para el pos-tensado (figura 8).



Figura 6
Pila central única, en proceso de ejecución. Fuente: colección particular.



Figura 7
Colocación de la catenaria y abrazaderas sobre marcas hechas de manera previa, gracias a la plataforma deslizante. Fuente: colección particular.

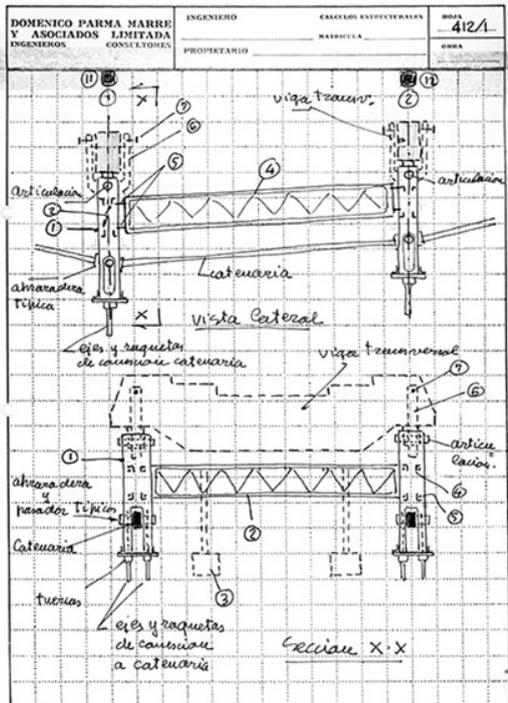


Figura 10 Sistema de posicionado de las vigas transversales en ejes 1, 2, 11 y 12. Fuente: Archivo Parma, Universidad de los Andes.

Desde el punto de vista estructural, todas las vigas transversales debían responder a tres estados de carga correspondientes a un número igual de fases: (a) manipulación y montaje, así como carga de las vigas prefabricadas longitudinales, (b) fundida de placas inferiores y superiores, y (c) puesta en servicio. Mientras las vigas transversales de los ejes 3, 4, 5, 13, 14 y 15 serían izadas mecánicamente valiéndose de las catenarias mismas del puente, las correspondientes a los ejes 1, 2, 11 y 12 se colocarían mediante una plataforma metálica de lanzamiento —diseñada también por Parma—, situada en cada una de las orillas del río (figura 11).

La mayor preocupación de Parma y su equipo de trabajo estuvo siempre en la nivelación de las vigas transversales, es decir, que su posición final coincidiera con las coordenadas diseñadas previamente ya que cualquier error considerable traería serios problemas constructivos al puente. De las memorias de



Figura 11 Lanzamiento de vigas transversales de los ejes 1, 2, 11 y 12. Fuente: colección particular.

cálculo que actualmente reposan en el «Archivo Parma» de la Universidad de los Andes, en Bogotá se destacan numerosas anotaciones en tal sentido.

Una vez todas las vigas transversales estuvieron en su posición final, se procedió al montaje de las vigas longitudinales, para lo cual se aprovechó la estructura metálica de lanzadera haciendo uso de carretones de 4 rodillos asegurados por encima a las vigas transversales. Inicialmente se montaron los tramos de la viga central desde los estribos hacia la torre, simultánea y simétricamente en ambos lados; posteriormente se montaron las vigas laterales en el mismo sentido (figura 12). Las tres vigas prefabricadas se situaban en los ejes E, G e I y por su interior estaban atravesadas por dos conjuntos de cables: 4 torones en



Figura 12 Posicionamiento de las vigas longitudinales mediante estructura auxiliar. Fuente: colección particular.

el alma y 8 en los patines que se enhebraban entre las vigas, todos pos-tensionados al 80% de su rotura.

Por último, en la etapa 6, se contemplaba la construcción de las placas correspondientes al tablero superior e inferior de las vigas. Entre los patines de ellas, a nivel de la cara superior, se fundieron placas macizas de 17 cm de espesor haciendo uso de plaquetas prefabricadas, reforzadas también con 4 torones pos-tensionados. A nivel de la cara inferior se fundió otra placa maciza, esta de 12 cm de espesor, con hormigón vertido in situ de tal manera que el conjunto formaba una gran viga tubular que contribuye a la rigidez torsional del puente (figura 13).

Papel importante en el proceso constructivo del puente lo constituyeron los equipos para el lanzamiento de las vigas y que Doménico Parma diseñó, en concordancia con la tradición profesional que había venido desarrollando durante muchos años. En este caso, se consideraron tres clases de equipos: unidades «T» empleadas en la traslación de vigas en tierra, unidades «C» que configuraban el puente transitorio para el desplazamiento de vigas sobre el vacío, y unidades «G» que operaban el desplazamiento y posicionado de las vigas sobre los estribos y la pila central.

Desde las primeras etapas de diseño, los elementos metálicos incorporados a las vigas de hormigón y que constituían el sistema de suspensión de la estructura, fueron también objeto de preocupación por parte de Parma. Adicionalmente, durante el proceso constructivo, se diseñaron más de 500 piezas diferentes entre platinas, anclajes, pasadores, etc., conside-



Figura 13
Posicionado de las vigas longitudinales mediante estructura auxiliar. Fuente: colección particular.

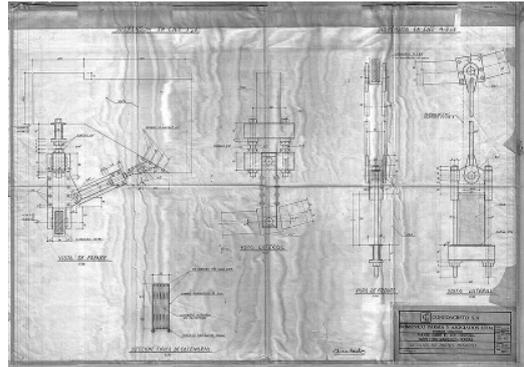


Figura 14
Detalles del sistema de suspensión del puente. Fuente: Archivo Parma, Universidad de los Andes.

rando tanto las que se integraban a este sistema, como todas aquellas que hacían parte de los equipos de montaje (figura 14).

El puente fue inaugurado el 22 de junio de 1991, de tal manera que las obras tardaron en total cuatro años, dos más de lo previsto y con posterioridad a haberse efectuado una prueba de carga mediante el tránsito de 20 camiones cargados con tierra que se detuvieron simultáneamente en cada una de los dos tramos de la estructura (figura 15).

El puente, bautizado ya con el nombre de su diseñador, recibiría en los años posteriores a su puesta en servicio el «Premio Nacional de Ingeniería» otorgado por la «Sociedad Colombiana de Ingenieros» y el



Figura 15
Prueba de carga sobre el puente. Fuente: colección particular.

«Premio a la excelencia» en la categoría Obras civiles por parte de la «Asociación Colombiana de Productores de Concreto – ASOCRETO».

En 1994 se presentó un daño en la estructura. Luego de una procesión religiosa sobre el puente que mantuvo retenido el tráfico, se produjo el paso consecutivo de varios tracto-camiones que produjeron un exceso de carga y con ello la rotura de uno de los pendolones, sin que se presentara un colapso gracias al instantáneo reacomodo de los estados tensionales y a la redundancia con que el puente había sido construido. La solución dada fue la instalación de una catenaria paralela a la existente capaz de recibir el 50% de la carga total del puente.

CONCLUSIONES

El seguimiento a la historia constructiva del puente «Doménico Parma» permite ver en él soluciones ingeniosas y creativas que son en buena medida resultado de formas de organización del proyecto consideradas incluso desde la fase misma de su diseño. Es entonces allí en donde bien vale considerar el carácter innovador de esta edificación en tanto cuenta con un proceso de planeación particular que determina la posibilidad de producir y concretar adaptaciones técnicas al caso particular que pretende resolver un problema dado.

Lo anterior cuenta con un punto de partida excepcional: la visión panorámica del ingeniero Parma que le permite atender el diseño del puente, con una manifiesta limitación de recursos económicos, pero abarcando las diferentes etapas de su ejecución como forma de respuesta a lo anterior. Pareciera entonces que el diseño en sí mismo es incompleto hasta tanto no se resuelven ya no los meros cálculos estructurales, sino también la secuencia ordenada de los procesos, descritos y previstos uno a uno en las memorias de trabajo.

Las adaptaciones técnicas por su parte, son más de tipo operativo y se producen como respuestas a requerimientos durante la etapa de ejecución: diseño de

herramientas y equipos para resolver temas de montaje, una industria de materiales de construcción incipiente, una mano de obra no cualificada y unas difíciles condiciones naturales para el trabajo son los aspectos que se deben enfrentar aquí mediante el ejercicio permanente del «ingenio», raíz innegable de la profesión.

LISTA DE REFERENCIAS

- Cortés, E.C. y Primmer, A. 2013. «Doménico Parma and Guillermo González Zuleta: a story of challenges, innovations and development of concrete architecture in Colombia». En *Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges*. Editado por P. Cruz: 1907-1914. Guimaraes: CRC Press.
- Mayor, Alberto. 2005. *Inventos y patentes en Colombia. 1930-2000*. Medellín: Fondo editorial ITM.
- Orozco, Luis Fernando. 1986. *Estudio de suelos y análisis de cimentaciones puente Chinchiná –Chinchiná– Caldas*. Bogotá: Manuscrito Archivo Parma, caja 143, Universidad de los Andes.
- Páez, Antonio. 1975. «Traslado del edificio Cudecom. Bogotá, Colombia». *Informes de la construcción*, 27(274): 49–64.
- Parma, Doménico. 1955. *Cálculo de entresijos reticulares*. Bogotá: Talleres Prag.
- Parma, Doménico. 1976. *Entresijo reticular celulado*. S.l.: s.i.
- Universidad de los Andes. Archivo documental Doménico Parma.
- Vargas, Hernando. 2008. «El desarrollo de la edificación en concreto armado en Colombia: el caso de los pioneros Doménico Parma y Guillermo González Zuleta (1945–1985)». *DeArq*, 04: 64–75.
- Vargas, Hernando. 2012. «RetCel: The Development of Floor and Roof Assemblies of Precast Concrete Cells in Colombia: 1949–1989». En *Nuts & Bolts of Culture, Technology and Society. Construction History*, vol. 3. Editado por R. Carvais et al.: 431–438. Paris: Piccard.
- Varini, Claudio. 2004. *Doménico Parma. Retrato científico*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Villate, Camilo. 2008. «Edificios en altura. La carrera técnica por ganar en el skyline. El caso colombiano: Doménico Parma». *Revista DeArq*, 03: 61–66.

