

EL PUENTE DE TEOSINTE UN CASO DE TECNOLOGÍA APROPIADA

Guillermo Candela García.
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RESUMEN

Generalmente, en las publicaciones de carácter técnico aparecen casos de desarrollo o aplicación de los últimos avances y tecnologías, en este caso, en el campo de la ingeniería civil. Por desgracia, en muchas ocasiones es muy difícil o incluso imposible el poder disponer de equipo o maquinaria para poder aplicarlos. En este caso, ni siquiera se podían emplear los medios más habituales para la construcción de estructuras; es aquí donde el ingeniero ha de poder conocer y aplicar técnicas adecuadas a cada caso concreto, aunque ya estén totalmente desfasadas y obsoletas... en el primer mundo.

ABSTRACT

Technical publications such as this Revista de Obras Públicas often present examples of the development or use of recent advances and technology in the Civil Engineering field. Unfortunately, many public works have to be constructed in conditions in which it is impossible to obtain the right equipment or machinery. In the case considered here, a small bridge over the El Padre River in El Salvador, not even the most basic construction equipment was available. This is when an Engineer must know and apply the right technique for each case, even using methods totally outdated and obsolete ... in the first world.

EL PROBLEMA

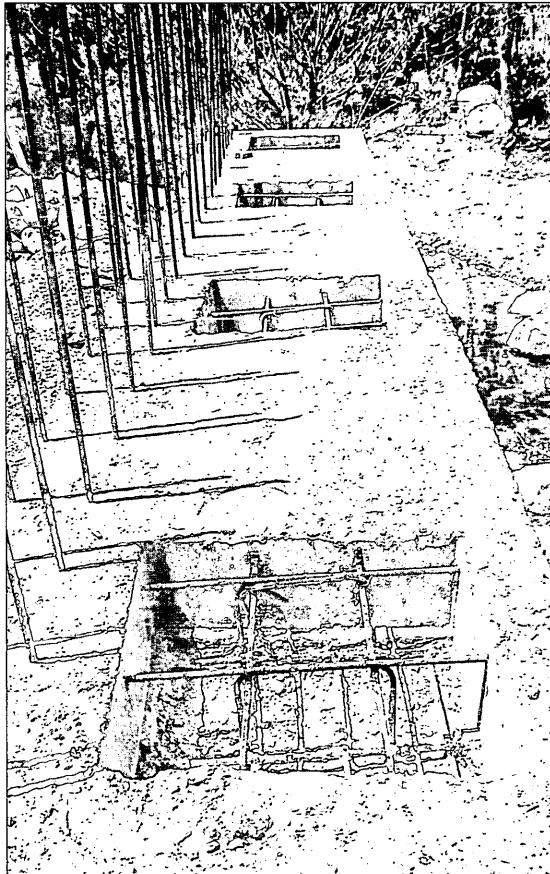
Teosinte es un cantón situado en una zona montañosa del norte de El Salvador, cerca ya de la frontera con Honduras. Su único contacto con la civilización es un precario camino que, con suerte, podían recorrer vehículos todo-terreno o camiones. En realidad, realizar el trayecto dependía de cómo estuviese el río El Padre, ya que había que vadearlo. Este, como la mayoría de los ríos tropicales, tiene un marcado carácter estacional, por lo que casi desaparece en la estación seca, transformándose en una avalancha torrencial tras las tormentas de la estación húmeda. Los más de tres mil pobladores que han de atravesar este río para poder comprar artículos de primera necesidad y vender sus productos, se encontra-

ban en multitud de ocasiones, durante el invierno más crudo, con una corriente infranqueable que en el mejor de los casos les hacía esperar varias horas hasta que bajaba a un nivel que ofreciese ciertas garantías de no ser arrastrados por las aguas. Pero siempre sin poder evitar empaparse. En las épocas más lluviosas, el aislamiento podía durar días, incluso semanas. Y todas las peticiones que los representantes de la comunidad hacían a las distintas Administraciones Públicas para que les construyesen un puente eran sistemáticamente rechazadas con excusas de tipo económico o con promesas que nunca se cumplían. Hasta que decidieron hacerlo ellos mismos.

A mediados de febrero de 1994, me localizó un representante de la Comunidad de Teosinte y me



Foto 1. El cauce, aguas abajo, a las dos semanas del inicio. En primer plano, las dos piedras que se dinamitaron. **Abajo, foto 2.** Viga de carga, con los huecos para conseguir apoyos monolíticos. Se puede apreciar la parrilla por la carga concentrada.



expuso el tema; necesitaban un anteproyecto para solicitar financiamiento y el posterior proyecto y supervisión de obra, y lo necesitaban ya: no querían quedarse aislados un invierno más. No me pude negar a ayudarles, al fin y al cabo para eso me fui para allá. Y el panorama para plantear la obra no era muy prometedor. Situado en una zona aislada, a dos horas de San Salvador, y con diez kilómetros de un camino de tierra que cuenta con varios tramos que precisan doble tracción, el acceso de los materiales se presentó como uno de los principales escollos a resolver. La posibilidad de financiamiento era reducida, y la única mano de obra disponible eran los voluntariosos y entusiastas campesinos de la zona; sin embargo, apenas había un par de ellos que sabían de albañilería o carpintería.

EL PLANTEAMIENTO

Visto el lugar, la ubicación del futuro puente era clara, ya que había una zona muy apropiada y la luz necesaria era del orden de 13 a 15 metros. Demasiado grande para un arco, o para vigas prefabricadas, debido a la imposibilidad de su transporte. Habría que hacerlo todo allí. Y tenía que ser

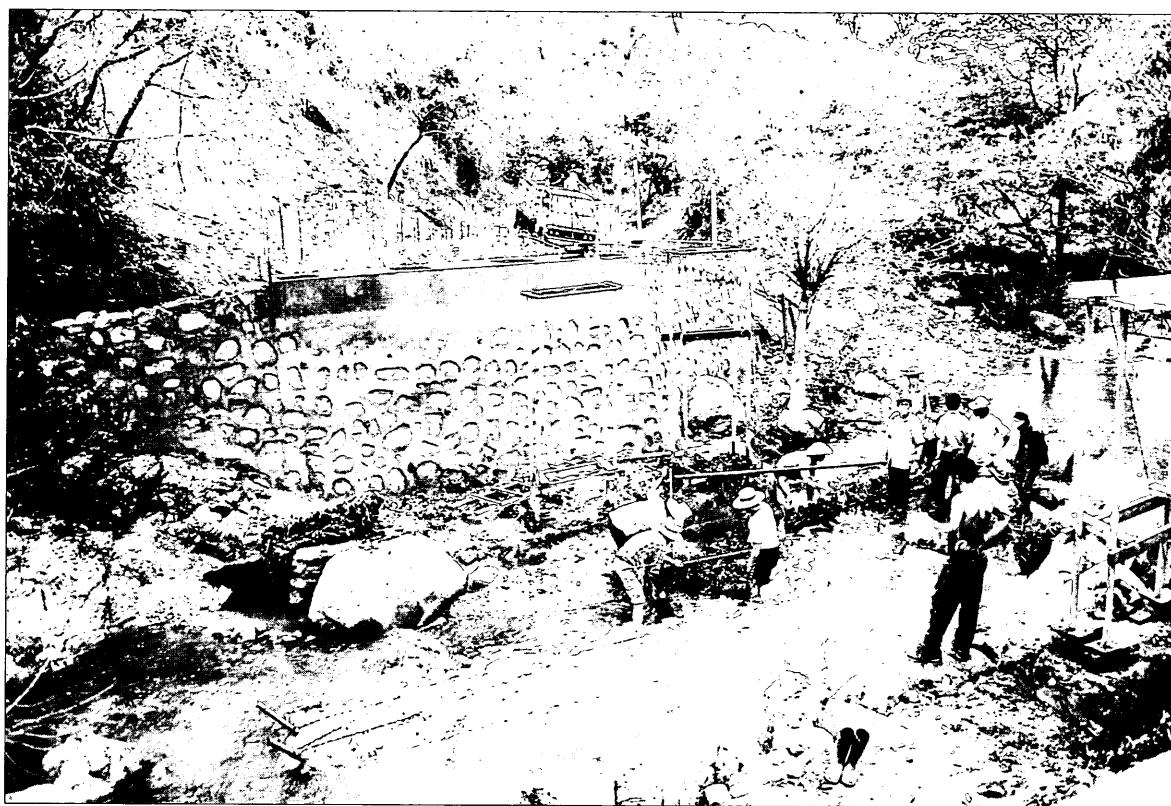


Foto 3.
Recogiendo la cimbra tras la tormenta.

Se pueden apreciar los tres muros de apoyo de la cimbra, con tubos empotrados en los extremos para facilitar el arrastre de las cimbras.

algo que fuesen capaces de hacer ellos mismos, con un mínimo de medios auxiliares. Afortunadamente, había agua y piedras en abundancia, pero apenas se disponía de arena ni grava. Por el encarcamiento que suponía, se desestimó la utilización de cualquier tipo de grúa, por lo que todo movimiento de materiales se había de hacer manualmente. Esta limitante condicionó enormemente todo el proyecto. Para hacer el hormigón se previó el alquiler de dos hormigoneras pequeñas de obra, de forma que proporcionasen suficiente producción y no se cortase el hormigonado en caso de avería. Esto imponía una limitación del volumen que se podía hormigonar de una vez, que se tuvo muy en cuenta a la hora de definir los elementos que habían de ser monolíticos: las vigas y la losa. Tomando en cuenta esta consideraciones, el planteamiento inicial se basó en la sencillez y economía: muros de gravedad de piedra con viga de carga en su parte superior, tablero formado por cuatro vigas en doble "T" de 1,20 m. de canto y 15 m. de longitud, cosidas por cuatro vigas ríostras de 100x30 cm², y losa superior de 20 cm. de espesor y 5,40 m. de ancho, todo ello de hormigón armado. El cálculo se hizo siguiendo la norma española para los puentes carreteros, sustituyendo el vehículo pesado de sesenta toneladas por

otro de veinte, más acorde con el uso futuro. La medición del plano del anteproyecto fue valorada de forma aproximada con precios de unidades equivalentes de proyecto en España de hace varios años, estimando que las diferencias en cuanto al costo de los materiales se compensaría con el menor costo de la mano de obra; según esto, el costo de ejecución del puente, sin incluir los muros de piedra y los terraplenes de acceso, ascendía, al cambio, a 2.250.000 pts. Con el plano y esa referencia de presupuesto, empezaron a llamar a todas las puertas para buscar financiamiento. Mientras, localizamos a un maestro de obra de confianza y aprovechando el siguiente fin de semana (5 de marzo), realizamos un escueto levantamiento topográfico de la zona, dejando establecidos los vértices de los muros de piedra y las bases de replanteo. Esta fue la única operación de replanteo topográfico que se hizo; todas las demás dimensiones precisas para la definición del puente se obtuvieron por medio de cotas relativas. Y sin tener todavía financiamiento, empezaron a trabajar inmediatamente doce campesinos y el maestro de obra, basándose en unos sencillos croquis.

La cimentación en uno de los laterales no daba problemas, ya que era sobre roca, mientras que la

otra se tuvo que hacer sobre antiguos acarreos: se profundizó 2 m, hasta el nivel freático, y los grandes bolos que aparecieron sirvieron de base para el muro. En ambos casos, la zapata del muro era de 1,40 m. de ancho y unos 60 cm. de espesor, siendo el arranque del muro de 1 m. de espesor, que variaba hasta los 80 cm. en la coronación. A lo largo de la siguiente semana, el Alto Comisionado de Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR), que en su día dirigió la repoblación de los refugiados salvadoreños, entre los que se encontraban las gentes de Teosinte, se comprometió a financiar en dos etapas los 2,25 Mill. de pesetas correspondientes a la estructura de hormigón. La ejecución ya era viable económicamente, y no se detendría hasta el final.

Durante las tres semanas que les llevó levantar los muros, se hicieron los planos del proyecto definitivo y se encargó el material necesario para la ejecución. Toda la gestión administrativa de la obra fue llevada por la directiva de la Comunidad, teniendo que ayudarles únicamente para encargar a un par de talleres la ejecución tanto de los moldes de madera como del juego de cimbras necesarios para hacer las vigas de hormigón armado, que precisaban de una definición precisa y detallada.

EL PROYECTO

En el proyecto final, se incorporó la topografía, fijándose la luz en 13,60 m; el cálculo de la estructura se hizo con un programa matricial, se comprobó la estabilidad de los muros y se hizo un estudio hidráulico con dos fuentes de datos: por un lado, la tradicional a partir de los datos de precipitaciones y de las características de la cuenca, que al poder conseguir muy poca información, dejaba demasiadas incertidumbres, pero que ya arrojaba un valor máximo de referencia: 200 m³/sg, lo cual parecía en exceso desfavorable. Por otro lado, la información vino de la observación del cauce, donde se podían apreciar los máximos niveles del agua, y de las entrevistas con la gente de la zona, que corroboraron estos niveles y proporcionaron otros muchos datos de interés. Al fin, se decidió dejar una sección libre de 45 m², que quedaba un metro por encima de los máximos niveles registrados y que, con una supuesta velocidad media de 4 m/sg daba una capacidad de desagüe más que aceptable (en posteriores observaciones se comprobó que la velocidad en crecidas era mayor, del

orden de 6-7 m/sg). Aún así, se vió la necesidad de mejorar las condiciones hidráulicas del cauce en la zona del puente, por lo que se retiraron piedras medianas, que se incorporarían a los muros, mientras que dos enormes bolos que entorpecían el flujo aguas abajo fueron suprimidos por medio de explosivos.

Por último, se incluyó en el proyecto el plan de ejecución, que resultó fundamental para poder concluir la obra. La prioridad eran las cuatro vigas, ya que a partir de ese momento la ejecución se podía independizar de las condiciones del cauce; por ello, se vio la necesidad de contar con dos juegos de cimbras y bases del molde y un juego de moldes laterales, de manera que el día después de hormigonar una viga, se retiraban los moldes laterales, y mientras ésta endurecía, se preparaba la siguiente, y cuando ésta se hormigonase, se pudiese descimbrar la primera para usar la cimbra y molde de base en la preparación de la posterior viga. La duración de este ciclo venía condicionada por la resistencia del hormigón, por lo que se estableció un control de la misma por medio de probetas: se hacían cuatro probetas por cada viga, rompiéndose dos de ellas a los 12-13 días y dejándose las otras dos para los 28 días. Se estableció la resistencia característica del hormigón en 200 kg/cm² y se fijó un mínimo de resistencia a 12 días de 150 kg/cm² para poder descimbrar. De esta manera, se consiguió hacer una viga por semana.

Pero lo más original del proyecto lo constituyen los aparatos de apoyo. En condiciones normales, se suelen diseñar apoyos de neopreno para las vigas, pero en nuestro caso, hubiese sido preciso importarlos al no estar disponibles en el mercado nacional. Dadas las limitaciones económicas y de tiempo, había que buscar otra tipología. Los aparatos de apoyo metálicos fueron desechados por motivos similares, y por ello se decidió hacer apoyos con los materiales de que se disponía: hormigón y varillas de acero. Y para ello, se utilizó una tipología bastante antigua, que desarrolló Freyssinet: una doble rótula plástica de hormigón, que funcionase como una biela. Estos elementos, de bondad contrastada, en la actualidad son difíciles de encontrar debido a su elevado costo y dificultad de ejecución, en comparación con otros tipos. Sin embargo, en este caso se contaba con mano de obra muy económica y dispuesta, y el diseño que se hizo era de sencilla ejecución. Se trataba de prismas de hormigón armado con base cuadrada de 20x20 cm² y 40 cm de

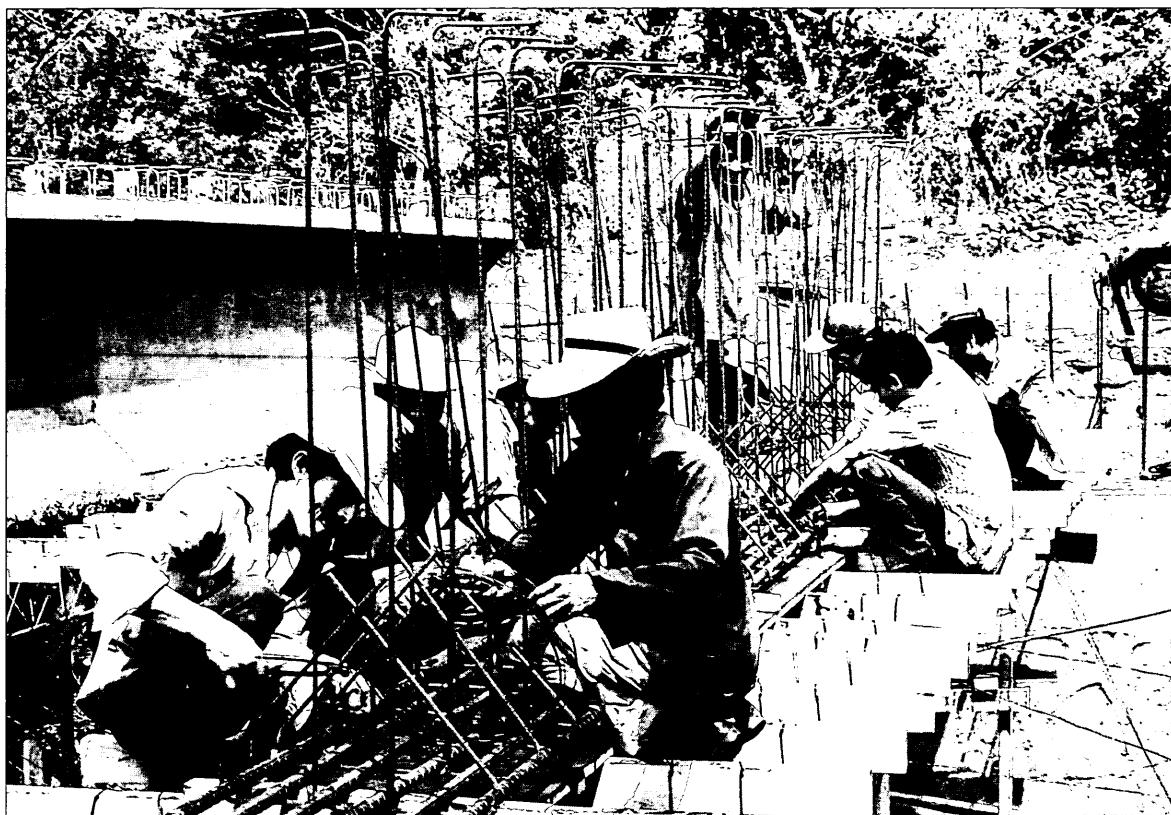
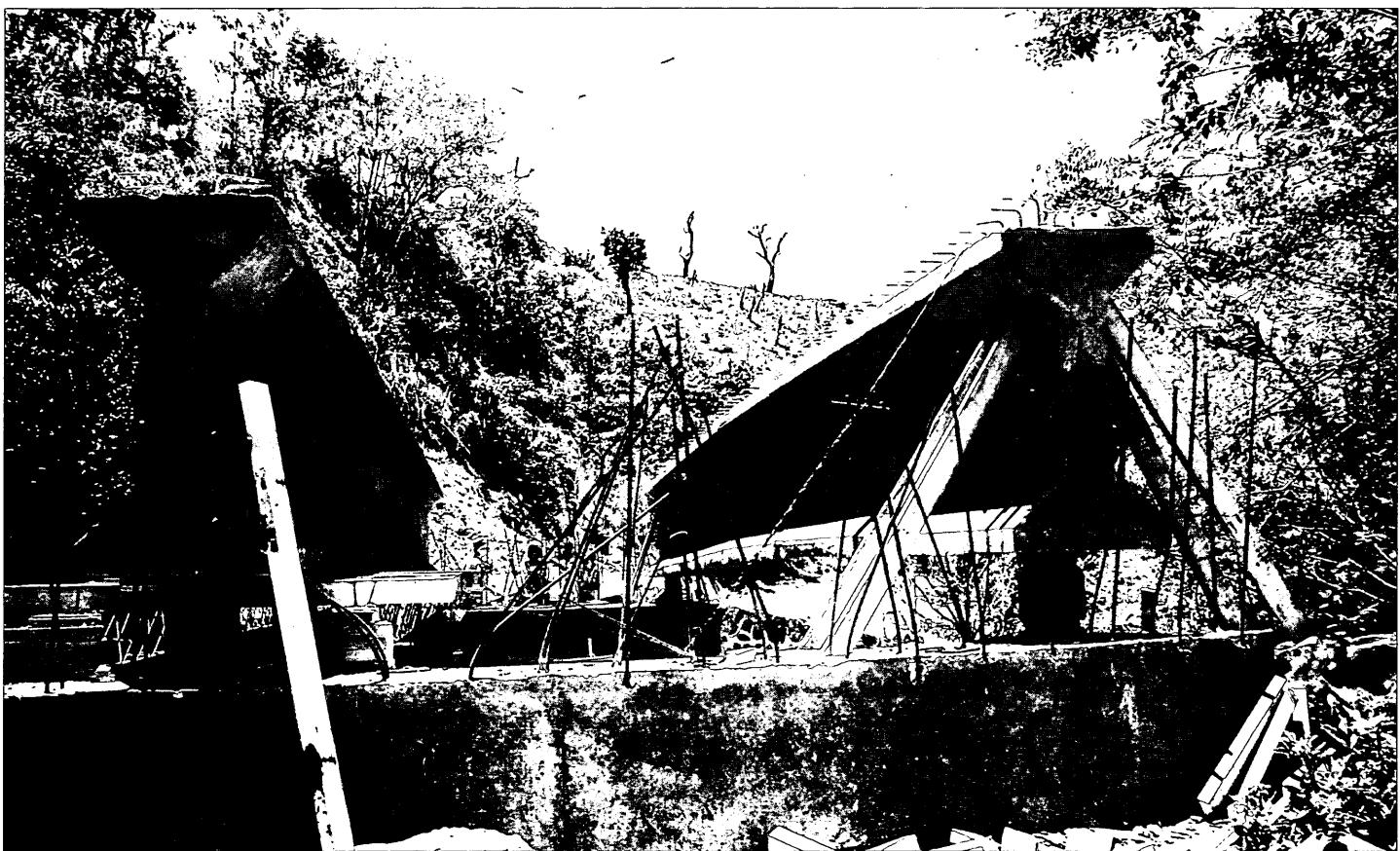


Foto 4.
Campesinos
preparando la
armadura de la
segunda viga.
Acabaron con una
gran destreza.

Foto 5.
Apuntalamiento
lateral para
descimbrar la
primera viga.
Se puede apreciar
la junta de
hormigonado,
los pequeños
apoyos y los
agujeros para
la armadura
de las vigas
riostra.



altura, con dos estrechamientos separados 30 cm que daban lugar a sendos cuellos de $20 \times 6 \text{ cm}^2$ de sección que se comportan como rótulas, funcionando el tramo intermedio como biela. Los estrechamientos tienen forma parabólica para evitar concentraciones de tensiones y aumentar la carga de rotura del hormigón. La armadura está constituida por cercos y barras longitudinales que se cruzan a la altura de los cuellos, contribuyendo a resistir el cortante, pero escasamente a la flexión. De esta manera, las más de 126 Tn. de peso muerto del tablero se distribuyen entre 8 apoyos con una sección mínima de 120 cm^2 , resultando una tensión media superior a los 130 kg/cm^2 . Por ello, los inevitables movimientos reológicos y térmicos del tablero producen un giro en los estrechamientos, facilitado por la plastificación del hormigón a compresión, sin llegar en ningún caso a la aparición de tracciones. Al tener una inercia a flexión muy reducida, este giro apenas introduce momentos flectores a la viga longitudinal o a la de carga, que era lo que se pretendía, por lo que los movimientos normales se absorben sin apenas introducir tensiones al tablero o a la cimentación.

Desde el punto de visto constructivo, la principal complicación de esta tipología residía en la necesidad de hormigonar base, apoyo y viga de una sola vez para garantizar el buen funcionamiento de la biela. Evidentemente, esto no era posible, por lo que se decidió dejar unos huecos en la viga de carga de $50 \times 50 \text{ cm}^2$ en planta y 20 cm. de profundidad, justo debajo de los apoyos y centrados respecto a estos, de manera que se hormigonasen simultáneamente con los apoyos y viga. El efecto resultante es que todos los elementos tendrían un comportamiento monolítico, tal y como se pretendía.

Respecto a las vigas longitudinales, debido a su gran relación canto/luz, resultaron muy poco armadas, con una armadura principal formada por seis barras de pulgada. Se dejaron con una contraflecha de 6 cm, que no sólo se adaptaba mejor a la rasante, que tenía el punto más alto en el centro del puente, sino que además facilitaba el drenaje del tablero y daba un favorable aspecto estético, inspirando seguridad. Para poder hacer las vigas riostras, se dejaron tubos pasantes de PVC a la altura de la armadura longitudinal de las riestras, lo cual garantizaba su continuidad. Para el tablero, se previó el uso de losetas de hormigón armado con un espesor de 4 cm y 55 kg de peso, que funcionasen como encofrado perdido, dejando las asas de transporte a una altura tal que sir-

viesen de apoyo a la parrilla superior de la losa. Las 90 losetas necesarias se hicieron en la misma obra, de manera que cuando fue precisa su utilización, la que menos tenía tres semanas de curado. El tablero resultó con un leve esvaje, de poco más de 3° , que no afectaba al cálculo pero si complicó la ejecución. Para facilitar el drenaje, se dejó una pendiente transversal del 1,5%, con sendos desagües en los extremos. Las juntas se dejaron libres, con una apertura de 2 cm. y perfiles en "L" como cantoneras tanto en la losa como en los espaldones; al poder entrar agua por la junta, se previó un canalillo para recogerla en la base de cada espaldón. Por último, se diseñaron sendas aceras de 50 cm. de ancho de hormigón armado, con los postes de la barandilla embebidos para asegurar su rigidez.

Respecto al movimiento de tierras, se dispuso el trazado de manera que se compensasen desmonte y terraplén, cuidando también de no obstaculizar el camino existente hasta el último momento. En total, había que mover unos 500 m^3 , que eran de roca muy deteriorada, de manera que funcionaba como una excelente zahorra natural. También se previó sembrar los taludes con grama.

LA EJECUCIÓN

Si bien el proyecto estaba pensado para las condiciones del lugar, la ejecución no careció de complicaciones. Uno de las principales era el transporte de los materiales, que debido al mal estado de la calle, hizo que se encarecieran bastante algunas unidades, principalmente la arena y la grava. La mayor parte de los materiales se compraron al principio, para reducir los efectos de tipo inflacionario en la medida de lo posible; sin embargo, no se pudo hacer así con el cemento, que llegó a pasar de 30 a casi 50 colones el saco (1 colón = 15 pts.). Para almacenar los materiales, se habilitó una casa en ruinas que había junto a la obra, dejándose un vigilante.

El área de trabajo se pudo establecer sin problemas en un rellano al lado de uno de los estribos; ahí se preparó la zona de prefabricación de losetas, un espacio amplio para descarga de grava y arena, el área de mezclado y vertido de hormigón, con las dos hormigoneras, y la mesa de doblado de armaduras. Dado que estas se habían de doblar a mano, sólo con grifas, se diseñó el armado de modo que la varilla más gruesa a doblar fuese de media pulgada, mientras que la armadura



principal, de pulgada (ø25), se disponía recta, sin quiebros. Más adelante, hubo que habilitar dos zonas cubiertas para almacenar los moldes y maderas.

La ejecución de muros y vigas de carga se desarrolló sin problemas; la prueba de fuego vino con la primera viga. Dado que había que cimbrar en el cauce, se dispuso el mínimo número de apoyos en él: toda la cimbra descansaba en tres torres formadas cada una por cuatro tubos de acero arriostradas por maderas; sobre cada cabeza se apoyaban dos pares de vigas armadas en celosía espacial triangular, muy comunes por allá, de 3 m. de longitud. Los tubos descansaban sobre unas bases de piedra y mortero en forma de muros, que garantizasen un apoyo firme aunque el agua pasase sobre ellos, ya que el posible socavamiento podía producir descalces fatales. De hecho, sin estos muros de apoyo no se hubiese podido hacer ni la primera viga.

Seis semanas después de empezar la obra, se montó la cimbra de la primera viga, dejándola arriostrada con cables de alambre de amarre. Pero ese sábado cayó la primera tormenta del invierno, descargando en poco más de una hora entre 60 y 70 mm. de agua. Nada más amainar, ya de no-

che, se fue a ver el río. Entonces se podía comprender lo que ha tenido que pasar esta gente todos estos años. El río había subido más de un metro y se había llevado la cimbra. A la mañana siguiente, mientras rescataban lo que podían, la desolación se dibujaba en sus rostros. Ya no podrían hacer el puente, pensaron. No fue fácil convencerles de que cuando estuviese la cimbra con más peso, esto no se repetiría; el caso es que diez días después se hormigonaba la viga.

Durante el hormigonado, el par de viguetas de un extremo de la cimbra sufrió pandeo local en dos diagonales debido a un deficiente apoyo, lo que provocó una flecha de casi 2 cm, sirviendo de poco los puntales que pusieron debajo. Tras quitar los moldes laterales, se comprobó que había una fisura longitudinal a la altura de la armadura principal, que aparecía en ambos lados, por lo que se temió que fuese pasante. Para colmo, cayó una gran tormenta cuando iban a la mitad, y la mayoría de la gente que había llegado de forma voluntaria se escaqueó, siendo imposible terminar el hormigonado ese día. Como consecuencia, se produjo un corte del hormigonado a la mitad del canto, con su consiguiente junta, que no se trató. Esto es, precisamente donde el rasante era mayor.

Foto 6.
Preparación del espaldón. Hubo que picar levemente los extremos de las vigas. Se puede apreciar perfectamente la disposición de las vigas riostra.

La solución que se dió a estos problemas fue en dos direcciones. Por un lado, se prepararon los siguientes hormigonados de manera que no se repitiesen estos fallos, como en efecto se consiguió. Por otro lado, se reforzó la viga deficiente; se comprobó que sin contar con el hormigón, el acero de los cercos podía soportar holgadamente el rasante introducido por el peso propio de la viga, mientras que la fisura no afectaría, por lo que se descimbró a las dos semanas ante el temor de los campesinos, que no creían que los apoyos pudieran soportar el peso. Para el descimbrado, se apuntalaron los extremos de la viga de manera que no hubiese vuelco lateral, dejándose así hasta unirlas a todas con la primera viga riostra. A la hora de ver los efectos del descimbrado, tanto sobre la junta como sobre la fisura, no se vio ninguna alteración, por lo que se decidió inyectar tanto la junta como la fisura, así como "coser" la viga aprovechando la realización de las vigas riostras: por cada una, se añadieron tres pares de cercos de media pulgada que pasaban por los tubos dejados para la armadura longitudinal de éstas, ampliando a su vez la anchura de la riostra a la altura de esa viga. La inyección se realizó más adelante, a base de resinas epoxi, y no fue difícil encontrar

el equipo ya que las resinas son ampliamente utilizadas allá para reparar estructuras dañadas por los frecuentes sismos de la zona. Al penetrar poco material, se comprobó que la fisura era poco profunda, lo cual dio bastante tranquilidad sobre el comportamiento futuro.

El resto de la ejecución transcurrió sin problemas, tal como se había planeado. El molde de las vigas riostra se hizo desmontando el de las vigas longitudinales, y para el hormigonado, se apoyó totalmente en las vigas ya hechas, para no verse afectadas por las ya frecuentes crecidas.

Para mejorar el comportamiento de las vigas, se apuntalaron después de su descimbrado, manteniéndose los puntales hasta dos semanas después de hormigonada la losa. De esa manera, aliviaban a la viga, que solo se llevaría el peso de la losa una vez que tenía la sección compuesta, con mucha más inercia, disminuyéndose consiguientemente las tensiones.

Una vez concluida la estructura, se contó con la inestimable colaboración de la maquinaria del Ministerio de Obras Públicas, que prestó su equipo y personal durante dos días a cambio de cubrir los gastos de gasóleo, aceite y horas extras, dejando una magnífica plataforma, de más de siete

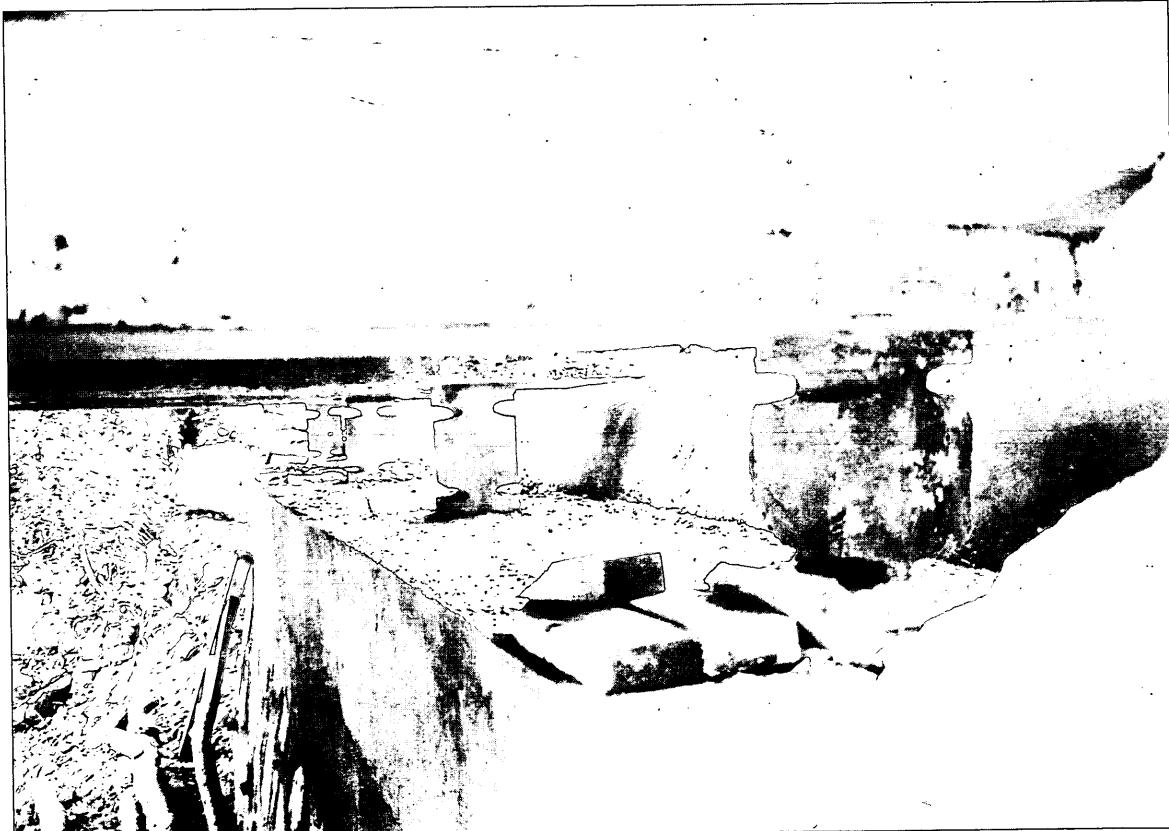


Foto 7.
Los cuatro apoyos de un lado.
Se distinguen muy bien los estrechamientos parabólicos y el efecto de biela.



metros de ancho y bien compactada. Se cuenta como anécdota, que mientras el rulo compactador pasaba de un lado al otro del puente, el maquinista conectó el vibro ante las miradas de pánico de los trabajadores, "para ver si de veras aguantaban esos apoyos tan raros". No apareció ni una microfisura.

LA TERMINACIÓN

Por fin, el 13 de julio, dieciocho semanas después de iniciarse los trabajos, se concluyó la obra. Se incluyeron detalles de acabado como una placa conmemorativa y la pintura plástica de la barandilla y de los paramentos vistos de hormigón, incluyendo los apoyos, no sólo por motivos estéticos sino también para proporcionar mayor protección. Había resultado una obra de gran calidad, a pesar de los rudimentarios medios disponibles; pese a haber hecho el hormigón con hormigoneras, el material se introdujo con medidas preestablecidas, lo cual dio lugar a una gran regularidad: la probeta que menos, rompió a los 28 días con 235 kg/cm², y la que más, resultó con 305 kg/cm². Todo el hormigón fue vibrado, por lo que apenas resultaron coqueras, siendo éstas repelladas con mortero rico en cemento. Esta calidad resulta especialmente re-

levante si se considera que el único técnico sólo llegaba un día a la semana, no pudiendo asistir a ningún hormigonado, por lo que todo lo hicieron los campesinos, dirigidos espléndidamente por el maestro de obra, que nunca había hecho un puente "tan grande". Fue una magnífica escuela de especialistas, de la que surgieron encofradores, ferallistas y peones especializados.

El costo total no llegó a los tres millones de pesetas, poniendo la cantidad que faltaba, correspondiente a los muros de piedra y al relleno, entre ACNUR y el Servicio Jesuita para el Desarrollo "Pedro Arrupe", que se entusiasmaron con el proyecto. Y el 16 de julio se inauguró con una gran fiesta, que duró hasta entrada la noche. Se había hecho realidad un antiguo sueño campesino. Y lo habían hecho ellos mismos. Todos dejamos un poco de corazón en ese río.

Esta obra ha supuesto un fuerte revulsivo para las gentes de la zona; ya todo son nuevos proyectos para los que buscan financiamiento. Uno de ellos es hacer un puente peatonal sobre el río Teosinte, similar al río El Padre, que hoy atraviesan por un precario puente de hamaca. Su estructura principal no será otra que la cimbra usada para las vigas. También esto se había previsto en el proyecto, porque aquí, con tanta escasez que hay, no se puede uno permitir el lujo de que sobre nada... ●

Foto 8.
El puente terminado, con el soporte de la placa conmemorativa en el extremo izquierdo. Más tarde, se sembraron los taludes con grama.