

# RESTITUCION DE LA RASANTE DEL PUENTE CHACO-CORRIENTES: Análisis numérico y verificación experimental

**Pedro J. F. Huerta y Carlos F. Gerbaudo**

Setec SRL, Sociedad de Estudios Técnicos y Económicos, Córdoba, Argentina

**Carlos A. Prato y Marcelo A. Ceballos**

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación estructural del puente en su estado actual y el análisis de alternativas de restitución parcial o total de la rasante del puente a través de un procedimiento de análisis numérico que incluye la calibración de un modelo con datos experimentales para determinar la rigidez efectiva del tablero. En una segunda etapa este modelo se utilizó para determinar el valor de carga permanente a través de mediciones indirectas. La verificación estructural de las secciones del puente se ha realizado a través de un método semiprobabilístico de coeficientes de seguridad parciales.

Asimismo se modeló el proceso de fluencia lenta del hormigón del tablero y del material de las juntas entre dovelas, incluyendo las deformaciones por acomodamiento de los cables cerrados, para completar el análisis del comportamiento estructural del puente.

## 1. INTRODUCCION

Como consecuencia de la fluencia del hormigón el perfil longitudinal de la rasante del puente sufrió deformaciones permanentes que dañaron los apoyos elastoméricos y afectaron seriamente las condiciones de circulación sobre el puente. En el año 1986 la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) contrató una serie de trabajos de reparación consistente en el recambio de los apoyos elastoméricos, construcción de cuñas de hormigón para salvar los desniveles en coincidencia con los tramos isostáticos, rehabilitación de anclajes de postensado dañados y pintura de las partes metálicas. En esta reparación también se realizó un refuerzo con pretensado interior adherente, y sellado de fisuras de los tramos isostáticos que vinculan entre sí a los semipuentes atirantados y a estos con los puentes de acceso, con un peso adicional de 81 t en cada tramo.

En esa oportunidad, al intentar el retesado de los tirantes largos para compensar las deformaciones acumuladas se observaron los primeros signos de deterioro en los cables. Como consecuencia se suspendieron las tareas de retesado y se decidió realizar, a posteriori, estudios en los obenques para evaluar la situación estructural de los mismos y del tablero del puente. La DNV comisionó diversos estudios de los obenques detectándose alambres cortados en algunos pocos obenques y luego del análisis de distintas propuestas de rehabilitación se decidió el reemplazo de todos los obenques del puente. Los trabajos de sustitución de los obenques comenzaron en Agosto de 1996 y finalizaron en Enero de 1998.

El contrato de sustitución de los obenques preveía una restitución parcial o total de la rasante a través del retesado de los obenques nuevos, con la limitación de que los esfuerzos introducidos para corregir las deformaciones permanentes no redujeran la seguridad estructural de las vigas principales y obenques a límites inferiores a los normalmente aceptado.

En este trabajo se presentan los estudios experimentales y analíticos realizados para evaluar el estado actual del puente y analizar alternativas de restitución parcial o total de la rasante.



*Figura 1. Puente Chaco-Corrientes*

## 2. DEFORMACIONES PERMANENTES DEL TABLERO

Para conocer el comportamiento estructural del puente, se analizó la evolución de las deformaciones permanentes del tablero obtenidas mediante nivelaciones de la rasante del puente realizadas desde la finalización de la obra en Mayo/1973 (“referencia cero”) y sucesivas nivelaciones del puente realizadas con cierta periodicidad hasta el año 1982, y una nivelación posterior en 1996 realizada en oportunidad de iniciar el reemplazo de los obenques. En la Figura 2 se representa esquemáticamente el perfil longitudinal actual del puente con las deformaciones permanentes.

Estas nivelaciones se realizaron durante distintas estaciones del año con grandes diferencias de temperaturas entre ellas. A través de registros de temperaturas tomados durante los años 1996/97, y teniendo en cuenta la temperatura ambiente de las nivelaciones históricas, se estimaron las temperaturas del tablero y de los obenques correspondientes a estas nivelaciones, para efectuar las correcciones por efectos térmicos con respecto a un sistema de temperaturas de referencia.

Los desplazamientos verticales en los cuatro extremos de los voladizos de cada semipunto son consistentes, es decir que son aproximadamente iguales, por lo que el desplazamiento vertical de los extremos del puente se representa a través del promedio de todos los puntos extremos de los dos semipuntos.

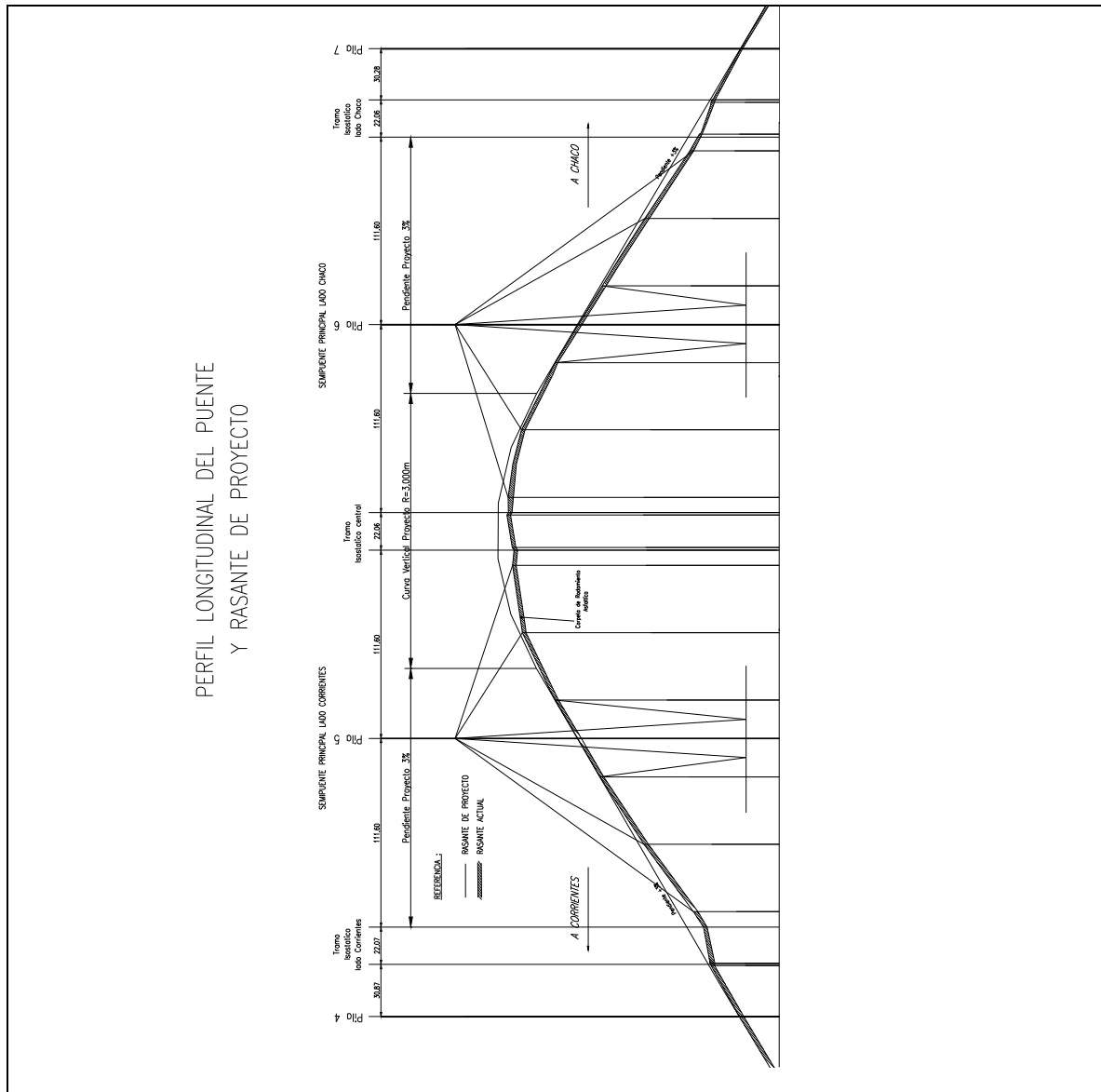


Figura 2. Perfil longitudinal actual de puente y rasante de proyecto

Fecha	Tiempo [años]	Desp. vert. medido [m]	Desp. vert. corregido [m]
8/5/73	0	0,000	0,000
26/06/74	1	0,139	0,133
07/11/75	2	0,218	0,227
09/11/76	3	0,239	0,239
22/09/77	4	0,233	0,244
27/03/79	5	0,267	0,255
12/12/79	6	0,267	0,261
28/10/80	7	0,268	0,261
04/06/82	9	0,296	0,280
20/11/96	23	0,295	0,295

**Tabla 1.** Desplazamiento vertical de los extremos del tablero vs. tiempo

En la Tabla 1 se presentan las diferencias altimétricas promedio de los puntos extremos de los voladizos y los valores corregidos por efectos térmicos. Del análisis de estos desplazamientos verticales se observa que a los 2 años de concluida la obra se produjo el 77 % de la deformación permanente total y que el fenómeno de deformación diferida se estabilizó aproximadamente a los 10 años de terminada la obra.

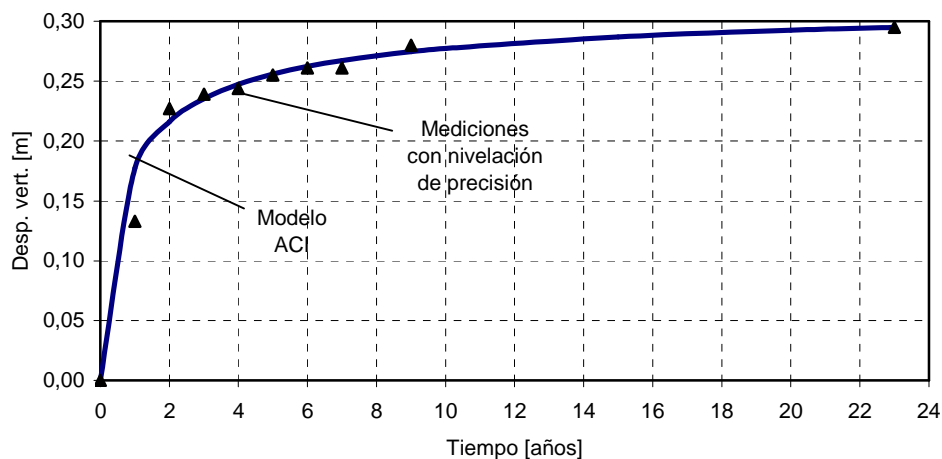
En la Figura 3 se presenta la curva de valores medidos de deformación permanente en función del tiempo y una curva de valores calculados en base al Modelo de Fluencia del American Concrete Institute (ACI) y se observa que las deformaciones medidas encajan dentro de una función típica de fluencia.

### 3. EVALUACION ESTRUCTURAL DEL TABLERO

La tarea de evaluación estructural del tablero del puente implica el conocimiento de las solicitaciones actuales en las vigas principales y la capacidad resistente de las mismas. Es de destacar la importancia que el criterio de seguridad estructural tiene en la valoración del estado actual de un puente y de posibles alternativas de restitución de la rasante.

Para la determinación de las solicitaciones actuales y capacidad resistente de las vigas principales del puente se determinaron las variables a través de:

- i) relevamiento de datos históricos
- ii) relevamiento de datos in situ
- iii) extracción de probetas y ensayos de compresión
- iv) técnicas de auscultación dinámica del puente
- v) medición de fuerzas en obenques mediante isotensión y gatos de reglaje
- v) modelo numérico de cálculo



**Figura 3.** Desplazamientos medidos vs. calculados según modelo ACI

- vi) conocimiento de las propiedades geométricas y mecánicas de los elementos estructurales y de la carpeta de rodamiento y rellenos de hormigón
- vii) conocimiento del comportamiento de los materiales.

A continuación se describen las variables que se determinaron para la evaluación estructural del puente:

*Resistencia del hormigón*

De datos de resistencia a compresión a 28 días de las probetas de hormigón de las distintas dovelas del tablero, obtenidos de los informes de laboratorio de la construcción de la obra, se calculó la resistencia característica del hormigón a 28 días para cada semipunto.

De una campaña de extracción de testigos del tablero y pila del puente realizada en Junio/1995 se obtuvo la resistencia característica actual del hormigón. En la Tabla 2 se presentan los valores de resistencia del hormigón y se observa que la resistencia característica del hormigón del tablero a 28 días fue un 7 y 3 % inferior a la de proyecto establecida en  $\sigma'_{bk} = 360 \text{ kg/cm}^2$ , para el tablero de la Pila 5 y 6 respectivamente. La relación de resistencia actual y resistencia a 28 días resultó en promedio de 1,155 que concuerda con valores determinados experimentalmente, por lo que la resistencia actual del hormigón supera el valor previsto en el proyecto.

Semipunto	$\sigma'_{bk}$ t = 28 días [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma'_{bk}$ t = actual [kg/cm <sup>2</sup> ]	Relación $\sigma'_{bk(\text{actual})} / \sigma'_{bk(28)}$
Pila 5	336	389	1,16
Pila 6	350	404	1,15
Valor medio	343	397	1,155

**Tabla 2.** Resistencia del hormigón del tablero

*Modulo de elasticidad del hormigón*

El módulo de elasticidad instantáneo actual del hormigón se determinó a partir de las características de resistencia a compresión de este material, según expresiones empíricas que relacionan el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión del hormigón, como lo reflejan la mayoría de las normativas existentes para construcciones de hormigón. El valor obtenido resultó de  $E_{ct} = 379000 \text{ kg/cm}^2$ .

*Características mecánicas de las vigas principales*

Para la determinación de las características mecánicas de las vigas principales del puente se consideraron los aportes del sobreespesor de la viga cajón y la colaboración del cordón y vereda en la rigidez de la viga, que se adicionan a la rigidez teórica obtenida de los planos de proyecto.

Los relevamientos in situ de los espesores de las almas y alas de la viga cajón arrojaron sobreespesores promedio de las almas de 0,01 m y de 0,025 m para el ala inferior. El momento de inercia adicional debido a los sobreespesores de la viga cajón principal del puente se evaluó en 6,6 % del correspondiente a la sección cajón típica y el aporte a la rigidez flexional de la viga del cordón interno y vereda que se encuentra monolíticamente vinculado con la misma resultó de 6,2 %, lo que totaliza un valor para la rigidez flexional de la viga un 12,8 % superior al momento de inercia obtenido de los planos de proyecto.

### *Carga permanente del puente*

La determinación de la carga permanente (C.P.) del puente se realizó por dos métodos independientes que arrojaron resultados similares:

- i) A través de la calibración de las propiedades dinámicas del modelo numérico del puente;
- ii) con un análisis de carga con espesores promedios relevados in situ y pesos específicos promedios determinados de ensayos de probetas.

Para la calibración del modelo numérico del puente se realizó en una primera etapa la determinación de la rigidez efectiva del tablero del puente mediante auscultación dinámica, con el objeto de ajustar el modelo numérico del puente para el seguimiento de las operaciones de cambio de obenques<sup>[3]</sup>.

En esa oportunidad se tomaron como datos conocidos las propiedades mecánicas (área, inercia flexional y torsional) de los elementos del tablero que se determinaron en base a los planos de proyecto y la masa de la estructura que se estimó en 1,15 veces el valor determinado de un análisis de carga según la geometría de proyecto. De esta manera se dejó como única variable del modelo el módulo de elasticidad del material y se procedió a ajustar el mismo de manera de minimizar una función objetivo que relaciona las frecuencias propias de la estructura medidas y las calculadas. El mejor ajuste (mínimo) se obtuvo para un valor efectivo del módulo de elasticidad del material de 425000 kg/cm<sup>2</sup>.

En una segunda etapa, para la evaluación estructural del puente, se calibró nuevamente el modelo numérico del puente para ajustar el valor de la carga permanente, utilizando los datos calculados de las propiedades mecánicas de los elementos del tablero (*12,8 % aumento de inercia flexional*) y un valor de 379000 kg/cm<sup>2</sup> para el módulo de elasticidad actual del hormigón, dejando como única variable la masa de la estructura. En este caso el mejor ajuste se obtuvo para un valor de la masa igual a *1,156 veces la masa obtenida de los planos de proyecto (15,6 % superior a la masa nominal)*.

En el caso de la valoración de la carga permanente a través de un detallado análisis de carga, considerando los espesores promedios de los distintos componentes del tablero obtenidos de relevamientos in situ y valores medios de los pesos específicos de los materiales resultante de ensayos de probetas extraídas del tablero del puente, el valor *resultó 1,135 veces la carga permanente de proyecto (13,5 % superior a la carga permanente nominal)*.

Finalmente se adoptó una carga permanente correspondiente a un valor intermedio de los resultados obtenidos por los dos métodos, de 1,15 veces la carga permanente de proyecto. En la Tabla 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Calibración del modelo a través de ensayos dinámicos	1,156
Análisis de carga	1,135
Valor adoptado	1,15

**Tabla 3.** *Coefficientes de ajuste de la carga permanente*

### *Fuerzas en los obenques del puente*

Las fuerzas en los obenques nuevos se determinaron por medición directa con el método de isotensión y con gatos de reglaje de 500 t de capacidad y fueron corregidas por efectos térmicos con respecto a las temperaturas de referencia.

### *Sobrecargas móviles*

Se adoptó una sobrecarga móvil uniformemente distribuida de 400 kg/m<sup>2</sup> y un coeficiente de impacto igual a 1,0 según el reglamento de Puentes de la Dirección Nacional de Vialidad y sus especificaciones complementarias. La sobrecarga móvil se aplicó en las dos trochas del puente, considerando

las líneas de influencia para determinar las solicitaciones máximas en cada una de las secciones singulares del tablero.

#### *Efectos térmicos*

Se adoptaron gradientes térmicos de ocurrencia normal obtenidos de registros de temperaturas realizados durante los años 1996/97, que resultaron del siguiente orden: a) En vigas principales del tablero: diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior igual  $\pm 2.5^\circ$ , b) temperatura media de la sección del tablero igual a  $\pm 15^\circ$  respecto a la temperatura media anual ( $20^\circ$ ), y c) temperatura media en los tirantes igual a  $\pm 28^\circ$  de diferencia con la temperatura media anual ( $20^\circ$ ).

Estos valores de variación de temperatura en tablero y tirantes respecto a la temperatura media se utilizaron para calcular las solicitaciones debidas a efectos térmicos para ser combinadas con valores máximos de las solicitaciones por sobrecarga móvil.

#### **4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS SOLICITACIONES**

Por la configuración estructural del puente atirantado, donde el tablero funciona como dos grandes voladizos de 90 m vinculados rígidamente con la estructura de la pila y con apoyos elásticos intermedios materializados por los grupos de obenques con luces parciales de 40 m, una pequeña variación de la carga permanente y/o de la fuerza en los obenques produce grandes modificaciones en la distribución de momentos flectores. Teniendo en cuenta este comportamiento del puente, se realizó un análisis de sensibilidad a las variaciones de la carga permanente y de la fuerza en los obenques.

##### *Variación de la carga permanente*

Se adoptó una variación de  $\pm 2\%$  respecto al valor medio de coeficiente de sobrepeso de 1,15 determinado que representa la máxima desviación medida respecto al valor de proyecto. Para una disminución del peso propio los momentos positivos y negativos del tablero se incrementan en forma muy marcada, aumentando un 20 a 50 % los positivos y disminuyendo entre un 70 y 100 % los negativos, llegando a una disminución del 112 % en la sección de empotramiento del tablero en la pila. Para un aumento de la carga permanente aumentan los momentos positivos y disminuyen los momentos negativos.

##### *Variación de las fuerzas en los tirantes*

Se adoptó un valor de variación de  $\pm 1\%$  respecto al valor de las mediciones de fuerzas realizadas en obra mediante el método de isotensión y gatos de reglaje, corregidas por efectos térmicos. Este valor de variación de fuerza tiene en cuenta la incertidumbre en la medición de fuerzas y temperaturas según la precisión de los equipos de medición. Para un aumento de la fuerza en los tirantes los momentos positivos aumentan entre un 55 a 60 % llegando a un incremento de 63 % y los momentos negativos disminuyen entre un 10 a 30 %. Para una disminución de la fuerza en los tirantes los momentos negativos aumentan y los positivos disminuyen.

En ambos casos de variación de la carga permanente y de la fuerza en los tirantes, el aumento o disminución de los momentos flectores es superior a la variación de la variable respectiva, es decir que este comportamiento es fuertemente no lineal. En las Figuras 4 y 5 se presentan la distribución de momentos flectores correspondientes a las respectivas combinaciones de carga permanente y fuerza en los tirantes.

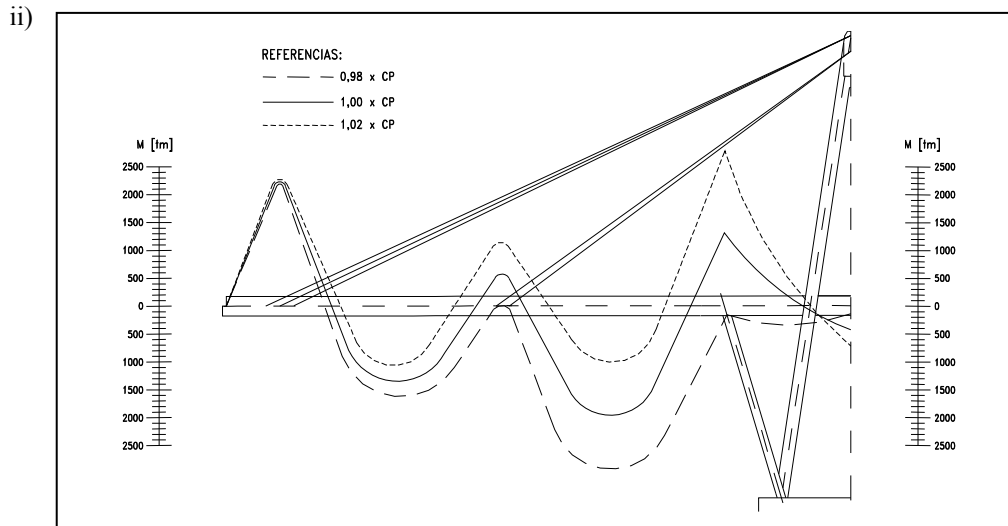
#### **5. CAPACIDAD RESISTENTE DE LAS SECCIONES SINGULARES DE LAS VIGAS DEL TABLERO**

Para evaluar la capacidad resistente de las secciones críticas del tablero se adoptó la geometría de la viga cajón y la disposición de armaduras pasivas y de pretensado según los planos de proyecto. Para esta valoración de la resistencia se tuvo en cuenta el aporte de losa que vincula las vigas cajón del tablero.

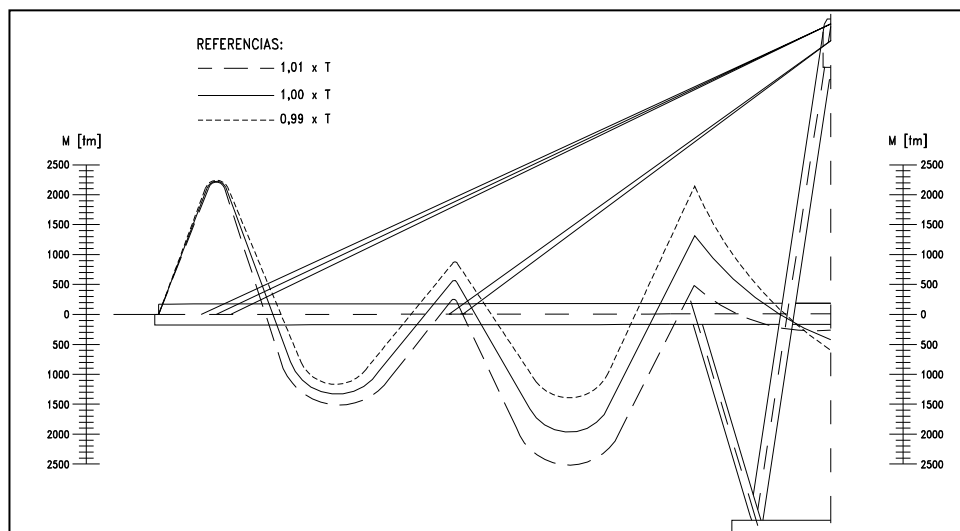
## 6. EVALUACION DE ALTERNATIVAS PARA RESTITUCION DE LA RASANTE

Para eliminar los quiebres en la rasante del puente producidos por las deformaciones permanentes del tablero se evaluaron distintas alternativas que se describen a continuación:

- i) Retesado de los nuevos obenques sin modificar los rellenos de hormigón de los extremos del puente y la carpeta de rodamiento existente y sin reforzar las vigas cajón principales del tablero.



*Figura 4. Ley de momentos flectores según variación de la carga permanente*



*Figura 5. Ley de momentos flectores según variación de la fuerza en los tirantes*

- ii) Refuerzo de las vigas principales del tablero y retesado de los nuevos obenques, sin modificar los rellenos de hormigón de los extremos del puente y la carpeta de rodamiento existente.
- iii) Eliminación de los rellenos de hormigón de los extremos del tablero y escarificado de la carpeta de rodamiento existente, realizando una nueva rasante compensada con rellenos de hormigón liviano y nueva carpeta de rodamiento de 5 cm de espesor.
- iv) Eliminación de los rellenos de hormigón de los extremos del tablero y escarificado de la carpeta de rodamiento existente, refuerzo de las vigas principales del tablero, retesado de los nuevos obenques y nueva carpeta de rodamiento de 5 cm de espesor.

v) Reemplazo de los tramos isostáticos existentes por otros de menor peso.

La viabilidad de estas alternativas se evaluó con los siguientes criterios:

- a) seguridad estructural del tablero y de los obenques del puente.
- b) factibilidad constructiva de las alternativas con respecto a mantener el tránsito durante los trabajos de reparación.
- c) Costo de las alternativas.

### *Seguridad estructural*

Este criterio es de vital importancia para valorar el estado del puente y las posibles reparaciones a realizar. En caso de falla estructural o colapso de la estructura con la consiguiente interrupción del servicio del puente, el costo real asociado a este acontecimiento es la suma de los costos de reparación y/o sustitución parcial o total del puente más los derivados de la interrupción del tránsito sobre el mismo, tales como una mayor distancia de transporte, aumento del tiempo de desplazamiento, posibles cortes y desvíos de servicio y otros costos.

Para evaluar la seguridad estructural se determinó el estado actual de solicitaciones del puente y las solicitaciones adicionales para restituir la rasante producto del retesado y/o las reparaciones y la capacidad resistente de las vigas principales del puente. Para las sobrecargas móviles debido al tránsito se adoptaron esquemas reales de cargas de vehículos pesados de acuerdo a las máximas cargas autorizadas por las reglamentaciones vigentes. Para la valoración de los efectos térmicos se utilizó los relevamientos de temperaturas en vigas principales y obenques realizados durante algo más de un año.

Debido al grado de conocimiento efectivo de las cargas permanentes y efectos térmicos, se adoptó un coeficiente parcial de mayoración de estas cargas igual a 1,1 que refleja esta situación; y para las sobrecargas móviles se adoptó un coeficiente de mayoración igual a 1,50 para tener en cuenta las incertidumbres propias de estas cargas respecto a las cargas originales de proyecto.

Desde el punto de vista de la seguridad estructural se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En el estado actual del puente, sin realizar refuerzos estructurales en las vigas principales del tablero y sin soliviar el peso de la carpeta de rodamiento y rellenos de hormigón, sólo es posible una recuperación de la rasante de 3,3 cm en los extremos del tablero lo que corresponde a un retesado de cada uno de los tirantes exteriores en aproximadamente 2,8 t.

Mediante el reemplazo de los isostáticos existentes por otro de menor peso sólo es posible restituir 12,5 cm en los extremos del tablero, es decir que las alternativas i) y v) no satisfacen el objetivo propuesto de mejorar la rasante del puente.

La restitución de la rasante del puente es factible mediante la aplicación conjunta de medidas correctivas tales como refuerzos en las vigas cajón del tablero (pretensado exterior, armadura pasiva adherida, etc.), rectificación de la carpeta de rodamiento y tratamiento de las juntas, para mejorar el confort del tránsito sobre el puente.

En efecto, las alternativas ii) y iv) permiten restituir la totalidad de las deformaciones permanentes (30 cm) mediante un retesado de aproximadamente 25 t en cada uno de los obenques exteriores y 20 t en cada uno de los obenques interiores, pero requieren un importante refuerzo estructural de las vigas cajón del puente en toda la zona comprendida entre las torres de la pila y el grupo de obenques interiores. La alternativa iii) permite obtener una nueva rasante con niveles de seguridad razonables para todas las secciones de la viga principal. Para todas estas alternativas la seguridad estructural de los obenques no se ve comprometida.

### *Factibilidad constructiva de las alternativas*

Las alternativas i) y ii) no requieren interrupción del tránsito sobre el puente, aunque para la alternativa ii) se consideró necesario reemplazar la carpeta de rodamiento existente que se encuentra muy



deteriorada. Las alternativas iii) y iv) requieren un programa de corte de tránsito en una mano mientras se realizan los trabajos sobre el otro carril. La alternativa v) requiere el corte total del tránsito durante varias jornadas, por lo que su factibilidad de ejecución es muy baja.

#### *Costos de las alternativas*

A excepción de la alternativa v) que tiene un alto costo ya que requiere grandes equipos para su realización y puentes auxiliares temporarios para salvar los vanos a reemplazar, las demás alternativas resultan de costos razonables con respecto al beneficio de recuperar y jerarquizar el nivel de servicio de una vía tan importante para la región y el país, y por lo tanto ninguna de estas alternativas es descartada de acuerdo a este criterio de selección.

### **7. CONCLUSIONES**

- La restitución de la rasante del puente es factible mediante la aplicación conjunta de medidas correctivas tales como refuerzos en las vigas cajón del tablero (pretensado exterior, armadura pasiva adherida, etc.), rectificación de la carpeta de rodamiento y tratamiento de las juntas, para mejorar el confort del tránsito sobre el puente.

- En la evaluación estructural de un proyecto de reparación o rehabilitación es posible aplicar coeficientes parciales de mayoración de cargas según el tipo de carga y la fiabilidad en la determinación de sus valores, considerablemente menores a los de proyecto.

- Es necesario valorar en forma precisa la carga permanente y la fuerza en los tirantes para determinar las solicitaciones y esfuerzos a que está sometida la estructura. Una pequeña variación de estas variables produce grandes variaciones en las solicitaciones flexionales de la estructura.

Por ello es necesario realizar el análisis estructural con los valores máximos y mínimos esperados para el peso propio y la fuerza en los tirantes, combinados de manera tal de obtener la envolvente de solicitaciones más desfavorables.

- En la selección de alternativas de reparación y/o rehabilitación es necesario considerar junto al criterio de seguridad estructural los de factibilidad constructiva y económica.

### **8. BIBLIOGRAFIA**

[1] Influencia de los errores de ejecución en el estado tensional de los puentes atirantados construidos por voladizos sucesivos, Ignacio Duque y Angel C. Aparicio, E.T.S. Ingenieros de Caminos de Barcelona.

[2] Diagnóstico, procedimientos constructivos y recomendaciones de diseño para el reemplazo de obenques de puentes atirantados: Experiencia de dos casos actuales en Argentina. C.Prato et. al. XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Argentina, Octubre/1997.

[3] Application of Ambient Vibration Measurements for Repair of de Chaco-Corrientes Cable-Stayed Bridge in Argentina. C. Prato et. al. International Seminar, Workshop and Exhibition: "The State of the Art of the Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures". Venezuela, Abril/1997.