

RECUPERACIÓN ESTRUCTURAL DEL TABLERO DE UN PUENTE MEDIANTE POSTESADO EXTERIOR

Ing. Rinaudo, Edgardo Luis; Ing. López, Rubén Edgardo
Rinaudo Cía. Constructora SRL
edgardo@rinaudoconstructora.com.ar - ruben@lopezre.com

RESUMEN

Analizado el estado de un tramo de puente de 30 m de luz (puente de 13 tramos), con importantes desplazamientos verticales (flechas) y con presencia de fisuración en todas las vigas, se llevó adelante la ejecución de la Reparación de la estructura del tramo N° 13, el más afectado, mediante Postesado Exterior.

Incertidumbres al momento de dimensionar el refuerzo, porcentaje de tesado original perdido, etc., obligan a que resolver las necesidades instantáneas de:

- a) Restaurar la capacidad resistente de la estructura.
- b) Recuperar un gran porcentaje de las deformaciones

La presencia de precargas existentes desconocidas, como pretensado residual, obligan a un monitoreo a largo plazo para ajustar la solución en el tiempo y garantizarla a futuro su efectividad.

En esta oportunidad presentamos los resultados de últimos monitoreos.

ABSTRACT

After analyzing the condition of a 30-meter span of a bridge (a 13-span bridge), which exhibited significant vertical displacements (deflections) and cracking in all beams, repairs were carried out on the structure of span #13, the most affected section, using external post-tensioning. Uncertainties in sizing the reinforcement, the percentage of original tension lost, etc., necessitate that the solution address immediate needs:

- a) Restore the structure's load-bearing capacity.*
- b) Recover a large percentage of the deformations.*

The presence of unknown existing preloads, such as residual prestressing, requires long-term monitoring to adjust the solution over time and ensure its future effectiveness.

This time we present the results of the latest monitoring.

ÍNDICE

1- Introducción	1
2- Recopilación de Datos en campaña.....	5
2.a- Control de Geometría del tramo.....	5
2.b- Materiales.....	5
2.b.1- Calado de probetas de hormigón	5
2.b.2- Esclerometría	7
2.c- Relevamiento de fisuras	7
2.d- Auscultación de tensores	8
3- Interpretación de resultados	15
4- Conclusiones Primarias.....	16
5- La Reparación	17
6- El monitoreo pos reparación	25
6.a- Conclusiones del monitoreo.....	26
7- Observaciones durante la visita 05/2026.	27

1.- INTRODUCCIÓN - EL PUENTE

El puente en cuestión cruza el Río Salado y está ubicado sobre la Ruta Prov. N° 4 Tramo R.P. N° 6 – Elisa, año de construcción 2008.

Longitud total: 400,40 m (13 tramos iguales de 30,80 m cada uno).

Ancho total: 11,40 m (calzada de 8,30 m y dos veredas peatonales de 1,55 m)

La sección transversal del tablero está compuesta por cuatro (4) vigas principales postesadas, prefabricadas al pie de obra, isostáticas, de altura constante de 1,77 m, con una losa superior de 15 cm de espesor (prelosa de 4,50 cm + 10,5 cm hormigonada in situ), con una separación entre vigas principales 2,60 m.

El Tramo 13, estribo lado Elisa (o margen derecha), con importantes deformaciones verticales, y un estado de fisuración en todas las vigas.

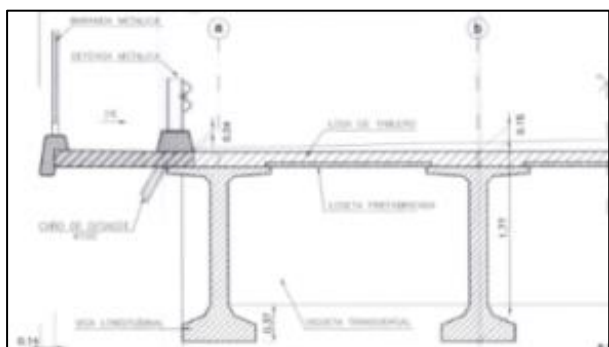


Figura 1. Sección en Centro de Tramo

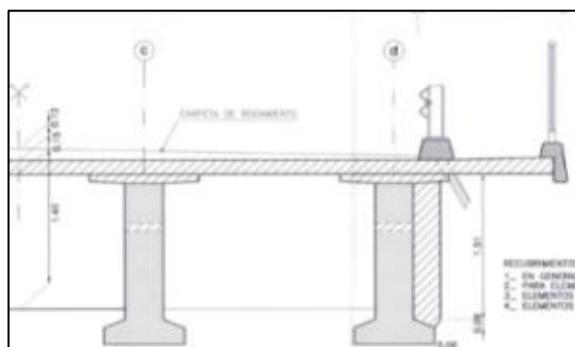


Figura 2. Sección en Apoyos

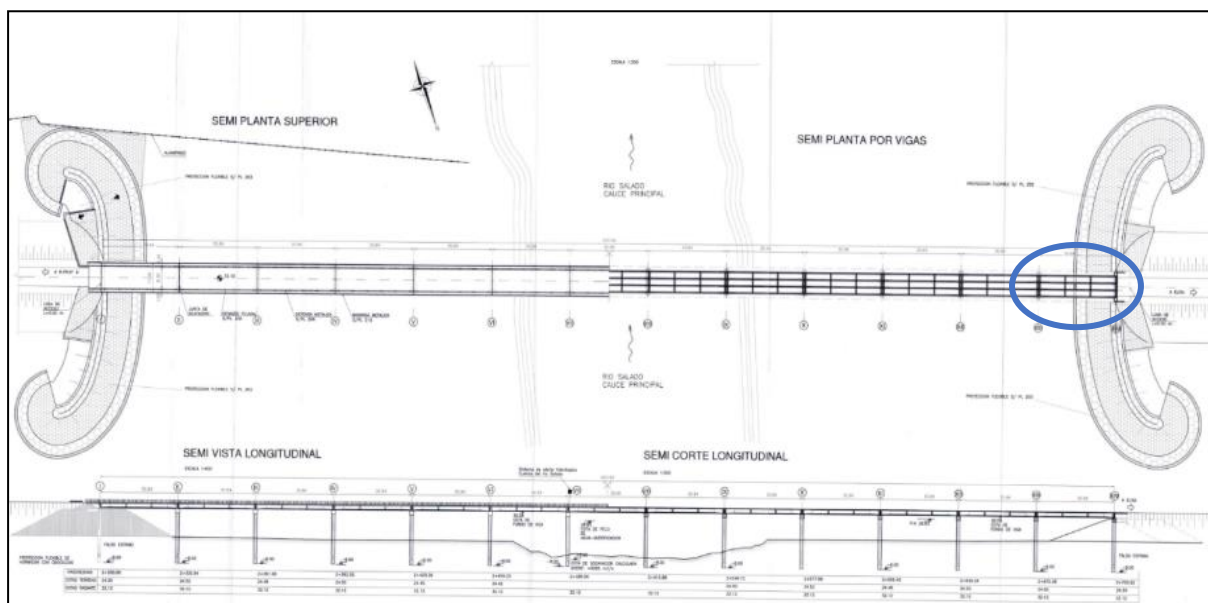


Figura 3. Planta general

El tramo 13 presenta importantes desplazamientos verticales, 9 cm en el centro del tramo, y fisuración en el sector central de las vigas.

Hasta concluida la reparación se restringió el tránsito de vehículos pesado debido a las importantes vibraciones que se observaban, minimizando un mayor daño.



Figura 4. Visual de los desplazamientos

2.- RECOPIACIÓN DE DATOS EN CAMPAÑA

2.a. - CONTROL DE GEOMETRÍA DEL TRAMO - DESPLAZAMIENTOS

Las mediciones fueron tomadas en el intradós de cada viga, posteriormente se realizaron algunas lecturas sobre las placas de acero de los postes de las defensas metálicas con resultados diferentes, pero con mismas tendencias.

El signo más (+) indica contra flecha, signo menos (-) indica flecha

Tramo	Viga N°			
	1 (aguas abajo)	2	3	4 (aguas arriba)
Tramo 13	-84	-68	-86.5	-29
Tramo 12	-7	+3	-15.5	-20
Tramo 10	+11	+4	-8	+8

Tabla 1. Desplazamientos "f" [mm] en centro de tramo por viga

Los desplazamientos en tramos 10 y 12 se encuentran dentro de rango previsto

Viga N°	Desplazamientos centro de tramo [mm] (respecto a los apoyos)
1	-84
2	-68
3	-86
4	-29

Tabla 2. Desplazamientos iniciales Tramo 13

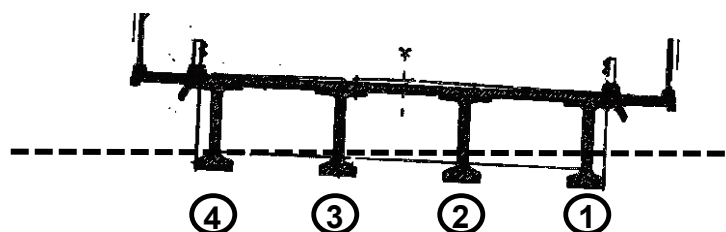


Figura 5. Esquema relación entre desplazamientos

2.b.- LOS MATERIALES

2.b1.- Calado de Probetas de Hormigón

Se calaron probetas de hormigón tomando muestras en el alma de la viga y losa de calzada, dispuestas convenientemente para no interferir con armaduras existentes y no introducir alteraciones a la sección de la estructura.

Resumen de Resultados obtenidos (Informe IMAE)

Resistencia hormigón promedio

Viga1(T13) **339.60** kg/cm²

Viga2(T13) **359.80** kg/cm²

Viga2(T12) **395.11** kg/cm²

Losas Tramo 13 **253.86** kg/cm²

Módulo de elasticidad **23659,5Mpa /241.232** kg/cm²

Al realizar el calado se observó un sobre espesor de carpeta asfáltica del orden de 18 cm en los bordes, esto es un importante incremento de carga muerta no considerada originalmente.

Se recomendó el retiro del sobre espesor de asfalto, mediante fresado. Debiendo definir espesor posterior al resultado de la reparación.

LOS RESULTADOS

Calidad de hormigón

Vigas: +H30 (de proyecto H30)

Modulo elasticidad: E = 22400/25300 MPa (s/CIRSOC 25700 MPa)

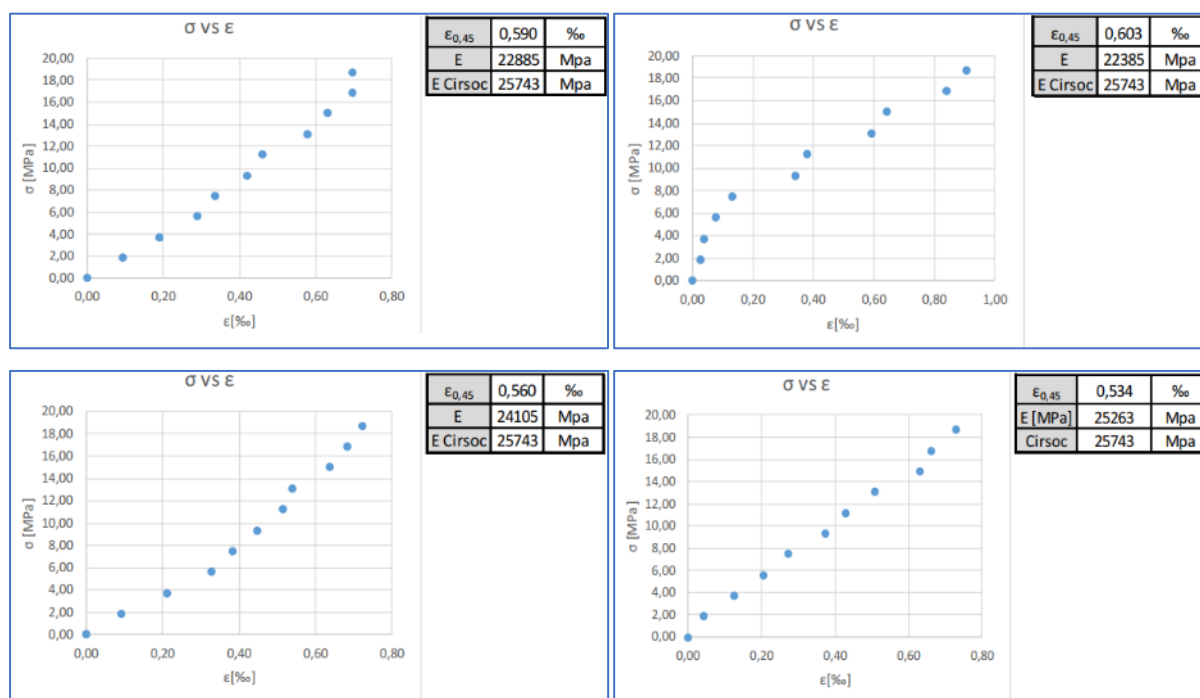


Figura 6. Resultados Modulo E, calados de probetas – Informe IMAE

Identificación	Ø	h1	h2/Ø	Carga	Tensión de rotura corregida		Fecha	Edad	Observaciones	OP	CI
		h2	K	Ton KN			moldeo ensayo				
Losa T13-P1	95	301	1,11	21,10	266,72	26,16				GG	1467
		105	0,90	206,92			06/11/2018				
Losa T13-P2	95	296	1,11	16,55	209,20	20,52				GG	1468
		105	0,90	162,30			06/11/2018				
Losa T13-P3	95	276	1,15	22,35	285,67	28,01				GG	1469
		109	0,91	219,18			06/11/2018				
V1-T13-1	95	192	1,65	25,90	355,16	34,83				GG	1470
		157	0,97	253,99			06/11/2018				
V1-T13-2	95	191	1,68	25,10	344,90	33,82				GG	1471
		160	0,97	246,15			06/11/2018				
V1-T13-3	95	155	1,17	24,80	318,74	31,26				GG	1472
		111	0,91	243,20			06/11/2018				
V2-T13-1	95	182	1,64	26,35	360,96	35,40				GG	1473
		156	0,97	258,41			06/11/2018				
V2-T13-2	95	185	1,38	25,30	337,66	33,11				GG	1474
		131	0,95	248,11			06/11/2018				
V2-T13-3	95	186	1,65	27,70	379,85	37,25				GG	1475
		157	0,97	271,64			06/11/2018				
V2-T12-1	70	190	1,70	15,65	396,90	38,92				GG	1476
		119	0,98	153,47			06/11/2018				
V2-T12-2	70	185	1,61	13,55	341,17	33,46				GG	1477
		113	0,97	132,88			06/11/2018				
V2-T12-3	70	191	1,59	17,80	447,26	43,86				GG	1478
		111	0,97	174,56			06/11/2018				

Tabla 3. Resultados Tensión de Rotura, calados de probetas – Informe IMAE

2.b2.- Esclerometría

Adicionalmente a los resultados obtenidos por el calado de probetas, se realizó una serie de esclerometrías para verificar la uniformidad del hormigón de los elementos estructurales estudiados

Resumen de resultados promedio de la serie de golpes

Independiente del valor de resistencia que pueda arrojar la Esclerometría, se observa un hormigón de características similares para las vigas y algo inferior en viguetas. Podemos concluir que hay uniformidad en la calidad del hormigón en el tramo.

Pte RP N° 4 s/ Río Salado																		
Viga	Tramo	Muestra																Promedio Lecturas
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
V1	13	42	43	42	42	50	48	50	48	48	48	49	46	50	47	49	48	47
V2	13	47	50	49	51	50	48	50	52	50	52	50	51	49	52	49	52	50
V2	12	44	44	43	43	42	43	43	39	45	44	44	44	45	39	42	42	43
V3	12	45	42	45	45	45	45	48	47	45	48	48	45	49	48	45	50	46
V4	1	50	48	42	46	50	46	48	48	50	50	50	48	50	48	50	48	48
Vigueta V2-V3	12	41	41	40	40	41	41	41	39	32	40	40	36	36	41	39	38	39

Tabla 4. Resultados esclerometría

2.c.- Relevamiento de Fisuras

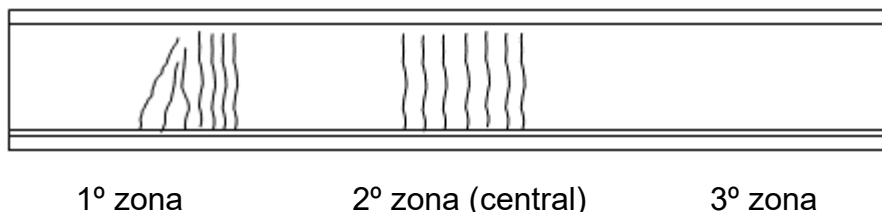


Figura 7. Distribución de fisuras

Podemos observar tres (3) zonas de fisuras, en la 1° y 3°, primero y tercer tercio de la viga (a 5m del apoyo hasta la vigueta del tercio) y la 2° zona, tercio central, entre viguetas.

Las fisuras observadas en zona 1° y 3° se repiten aproximadamente cada 50 cm con abertura entre 0.1 mm y 0.2 mm, una vez ingresando al alma de la viga se inclinan a 45° y se vuelven verticales hacia el tercio central, en cambio en la zona 2° (tercio central) su separación es de 45 a 50 cm y abertura entre 0.15 a 0.2 mm y alcanzando unos 80 cm medidos respecto del intradós de las vigas.

Un recuento en los 20/25 m fisurados, muestra un acumulado de 5 a 7mm de abertura de fisuras en la fibra inferior de la viga → fibras fuertemente traccionadas.

2.d.- Auscultación de tensores

Ubicación de auscultaciones en vigas principales

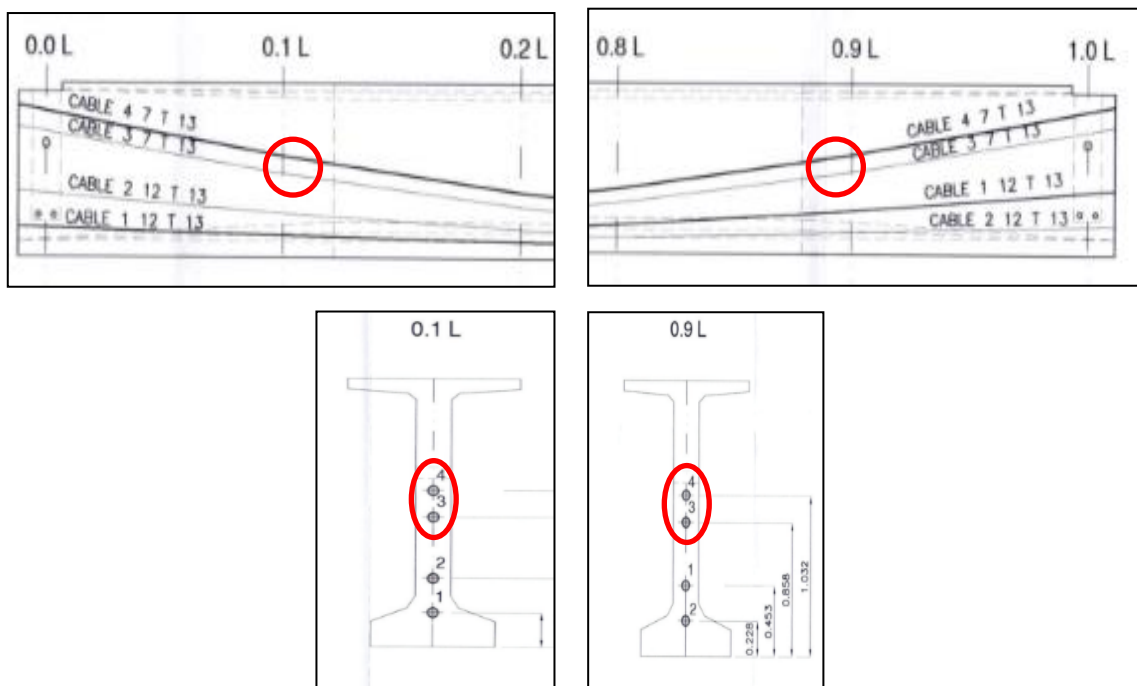


Figura 8. En Vigas 1 y 2 - Tensores 3 y 4 en extremos

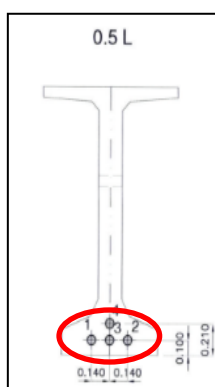


Figura 9. En Viga 1 - Tensores 1, 2 y 3 en centrares

IMÁGENES

Viga 1 - Lado Estribo - Tensores: T3 y T4

1) Sin o con mala inyección, (inyección blanca, textura talco/tiza sin determinar sus características)

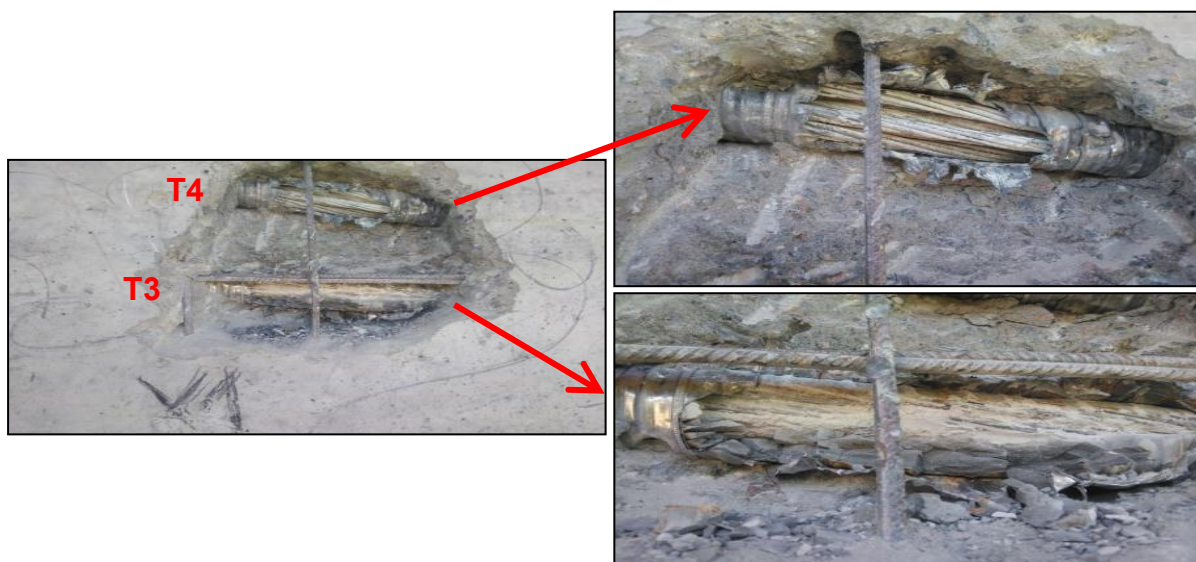


Figura 10. En Viga 1 - Tensores 3 y 4 lado estribo

2) Cordones sin tensión



Figura 11. En Viga 1 - Tensor 4 lado estribo

Viga 2 Lado Estribo - Tensores: T3 y T4

1) Sin o con mala inyección

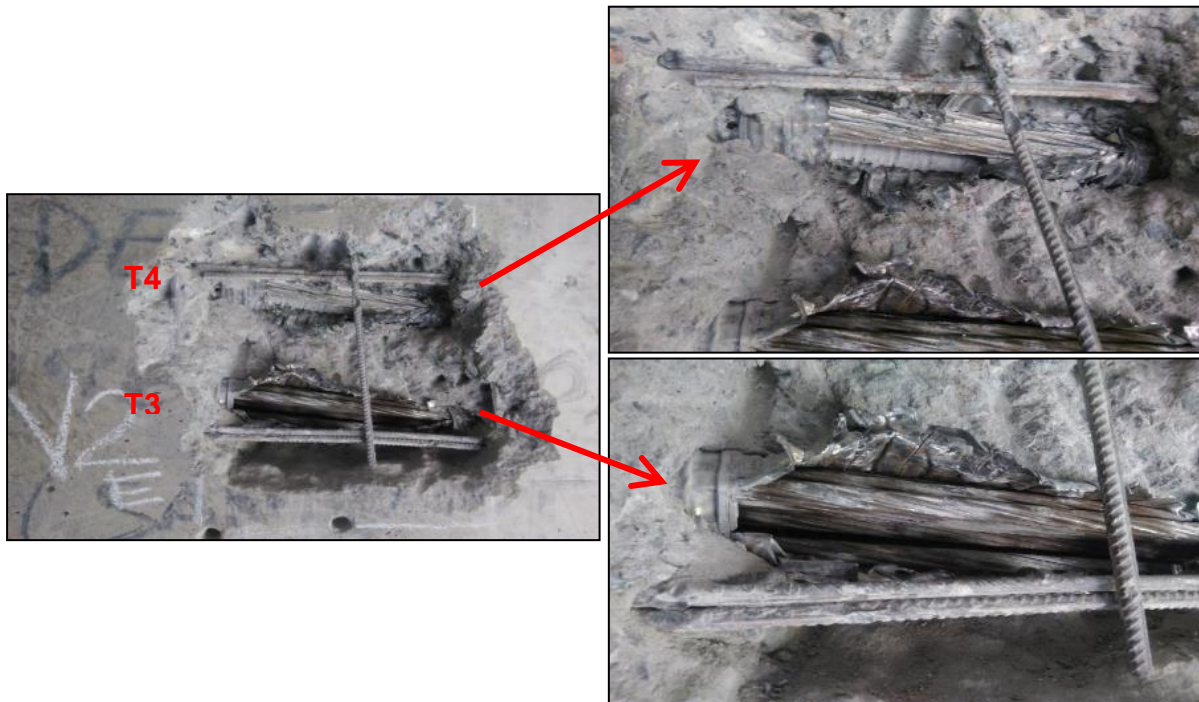


Figura 12. En Viga 2 - Tensores 3 y 4 lado estribo

2) Cordones sin tensión

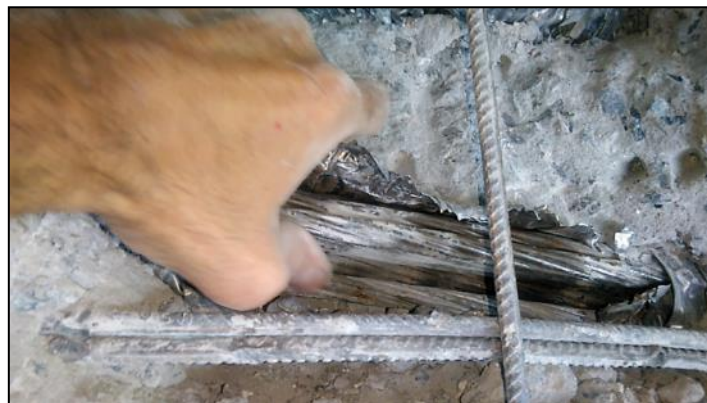


Figura 13. En Viga 2 - Tensor 4 lado estribo

Viga 1 Lado Pila - Tensores: T3 y T4

- 1) T4 sin inyección, T3 con inyección y corrosión.
- 2) Algunos cordones en T4 sin tensión



Figura 14. En Viga 1 - Tensores 3 y 4 lado pila

Viga 2 Lado Pila - Tensores: T3 y T4

- 1) Con mala inyección y corrosión
- 2) Cordones sin tensión

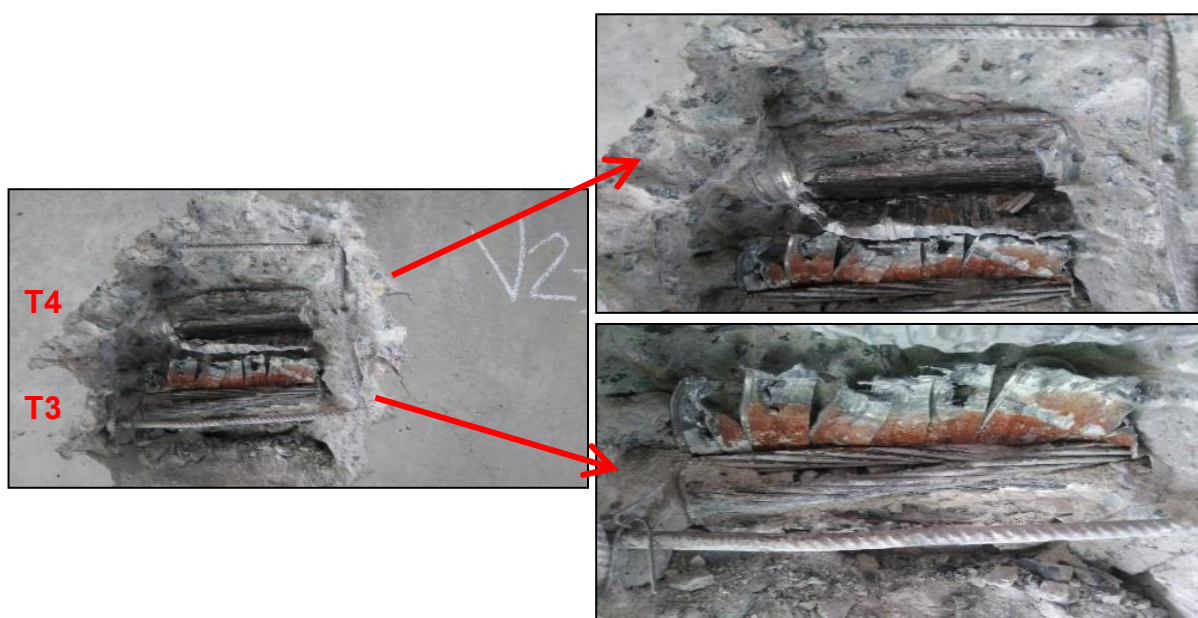


Figura 15. En Viga 2 - Tensores 3 y 4 lado pila

Viga 1 Lado Centro de Tramo - Tensores: T1, T2 y T3



Figura 16. En Viga 1 – Vista ubicación auscultación inferior

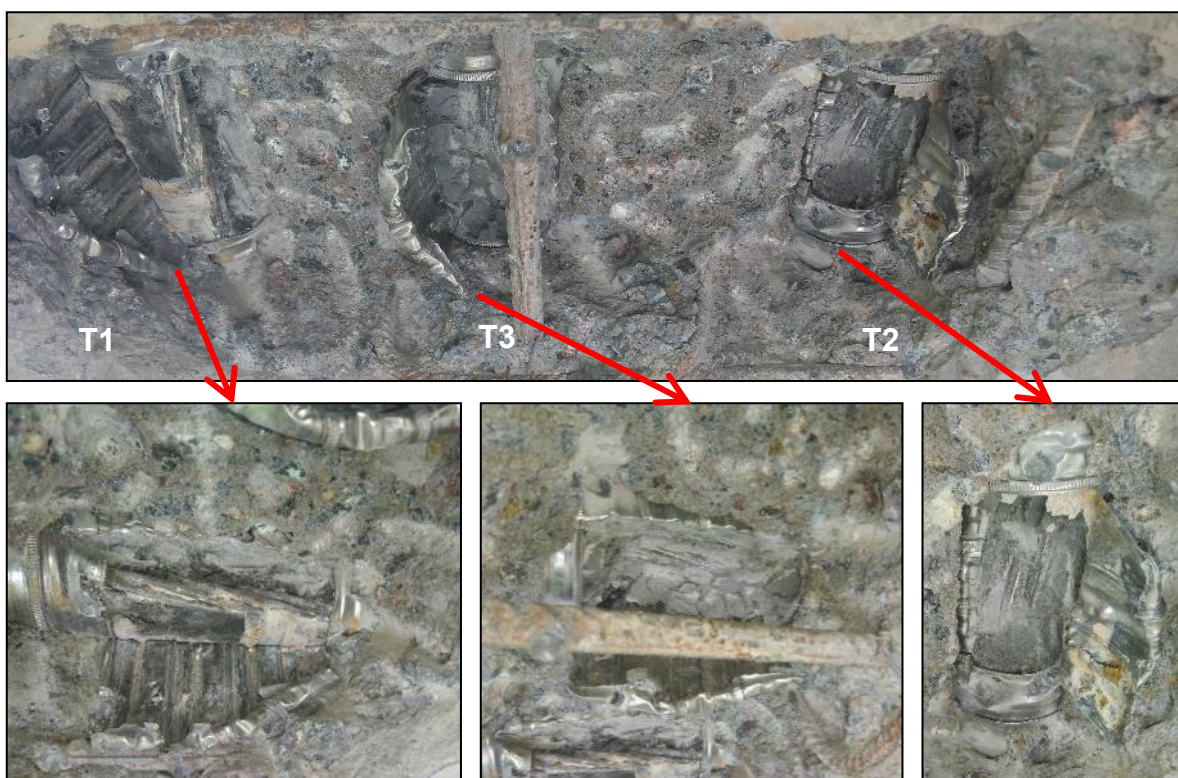


Figura 17. En Viga 1 – Vista ampliada de la auscultación

Tensor T1

- 1) Buena inyección y poca corrosión
- 2) La posición baja dentro de la vaina de un cordón podría indicar que no tiene tensión, pero al estar inyectado, manualmente no lo percibimos. Con el sentido de concavidad, (al tesar todos los cordones se apoyan en parte superior de la vaina).



Figura 18. En Viga 1 – Auscultación tensor 1 – centro de tramo

Tensor T2

- 1) Buena inyección y poca corrosión
- 2) No podemos observar sobre la posibilidad de cordones sin tensión, al menos están sobre cara superior de la vaina.



Figura 19. En Viga 1 – Auscultación tensor 2 – centro de tramo

Tensor T3

- 1) Buena inyección y poca corrosión
- 2) No podemos observar sobre la posibilidad de cordones sin tensión, al menos están sobre cara superior de la vaina.



Figura 20. En Viga 1 – Auscultación tensor 3 – centro de tramo

En la fotografía de las vainas con falta de inyección detectadas, podemos observar:

- Vainas vacías o inyectadas parcialmente, producto de obturaciones o mala práctica de inyección
- Cordones ubicados en la parte inferior de la vaina, indicio de cordones sueltos, cortados o con bajas tensión
- Algunos cordones están destrenzados, similar a la apariencia de cordones cortados
- Presencia de un material o sustancia blanco y blando, en capas o betas dentro de las vainas, según observaciones de un laboratorio este material es el resultado de preparar lechada de inyección con agua salada (del río).

3.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Analizando la Memoria de Cálculo del Proyecto, la estructura del tablero fue diseñada con pretensado total, no pudiendo aceptarse tracción, la realidad muestra la presencia de fisuras a lo largo de toda la viga y muy especialmente en el centro del tramo.

Para que esta situación ocurra, deben darse una serie de causales combinadas y de muy difícil apreciación por separado.

Dos grandes causas podemos suponer

- ✓ **Pedida del pretensado aplicado**
- ✓ **Variación de la resistencia del hormigón por condiciones reológicas del mismo, o mala calidad del hormigón colocado**

El estado tensional teórico de cada viga para puente vacío, con pérdidas totales teóricas, después de las pérdidas de pretensado, en el Centro del tramo, son:

$$\sigma_{\text{inferior}} = - 655 \text{ t/m}^2 \qquad \sigma_{\text{superior}} = - 704 \text{ tn/m}^2$$

Con una deflexión en el centro de + 25.0 mm

Módulo de Elasticidad informado en muestreo

$$E_o = 241.232 \text{ kg/cm}^2 \text{ (según Cirsoc para H30 } E_o = 25743 \text{ Mpa)}$$

Intentamos establecer la mecánica que provocó la falla y sus consecuentes deformaciones excesivas en el tramo.

Realizando un estudio tensional y secuencial de las distintas etapas de los elementos estructurales del tablero, iniciando por supuesto, con la etapa de prefabricación.

Finalmente suponiendo una pérdida del 50 % del pretensado aplicado, la estructura estaría al límite, y cualquier carga o sobrecarga de tránsito pondría a las vigas en un proceso de fisuración. A manera ilustrativa evaluamos las deflexiones provocadas por cargas de tránsito pesado y para una inercia fisurada homogeneizada nos arroja deformaciones del orden de las medidas en campaña.

Producida la fisuración, al no disponer del pretensado necesario, la estructura no tiene posibilidades de recuperar su geometría original, manteniéndose fisurada, con una nueva inercia de sección fisurada (**I_{cr}**) 4 o 5 veces menor, generando una situación crítica del tramo.

Resumen de Tensiones centro tramo

Cargas permanentes + pérdida del 50% de postesado

$$\sigma_{\text{inferior}} = 111 \text{ t/m}^2 \qquad \sigma_{\text{superior}} = - 767 \text{ tn/m}^2$$

Adicionado las Carga Accidentales

σ inferior = 830 t/m²

σ superior = - 1193 tn/m²

Fuerte tracción de 83 kg /cm²

Esta rápida y aproximada verificación avala la existencia de una marcada fisuración.

4.- CONCLUSIÓN PRIMARIA:

Podemos afirmar que la principal causa de la situación actual de la estructura, deformada y fisurada, es una importante pérdida del postesado aplicado.

Resultando menos importante la influencia que pudiera introducir las ligeras diferencias de hormigones colocados, que por cierto son del orden de las características exigidas.

Esta conclusión se confirma con la detección de vainas vacías, sin pasta de cemento, mal inyectadas, cordones sueltos y/o cortados y presencia de óxido en dos vigas del tramo inspeccionado.

No pudo confirmarse si la falta total o parcial de inyección, (obturación de sectores de vainas que impidieron el correcto llenado), en las vainas auscultadas encontramos sectores con ausencia de inyección o parcial y de mala calidad.

En el caso de vainas con presencia de pasta de inyección, los cordones están ubicados en la parte inferior del alojamiento, posición ilógica ya que dada la trayectoria del cable deberían estar en la parte superior. Arrojando un nuevo supuesto, que los cordones pudieran haber sido tesado en forma incorrecta o se pudieran haber zafado o aflojados por una falla del Sistema del Anclaje utilizado previo a la inyección.

La deficiente protección de los cordones produce la oxidación rápida (*fenómeno "corrosión bajo tensión"*) y su relajación y/o corte de los mismos, aportando a la pérdida de postesado de la sección.

Esta pérdida de tensión en los cordones puede estar incrementada por la falla del Anclaje Activo del Sistema de Tesado utilizado que no utiliza mordazas de acero para cada cordón sino una cuña de hormigón que ancla el conjunto de los cordones, (según relatos, no pudo ser comprobada) no aconsejada para cordones y utilizada solo para alambres de pretensado. Esta falla se magnifica con la falta de inyección de las vainas, ya que, de existir una buena colmatación de las vainas, la posible falla o deslizamiento de cordones, activa el mecanismo de anclaje de los mismo por adherencia activa entre el cordones, vaina y viga.

Las afirmaciones del Sistema de Tesado y Anclaje utilizado fueron obtenidas por descripciones verbales recogidas por integrantes en la ejecución de la obra. De

29° JORNADAS ARGENTINAS DE
**INGENIERIA
ESTRUCTURAL**
16 al 18 de septiembre de 2026 - Córdoba

La capacidad ultima instalada es de 340 tn/cable o 680 tn/viga.

Se previó no activar el 100% de la fuerza de tesado disponible, decidiendo del valor máximo durante el proceso de tesado y analizando la respuesta en la recuperación. Sistemas de Tesado utilizados en tensores y anclajes: FREYSSINET.

5.b.- ARMADO DEL SISTEMA

5.b.1.- ALISTAMIENTO DE MÉNSULAS DE ANCLAJE Y DESVIADORES

(Posteriormente galvanizados)

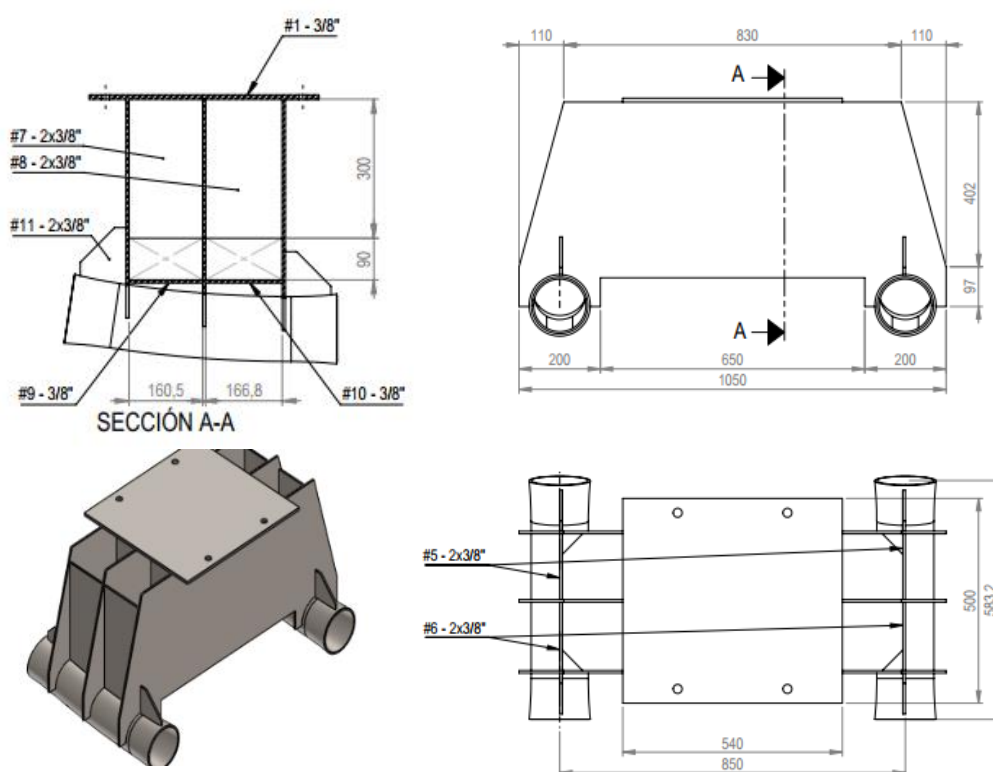


Figura 23. Desviadores

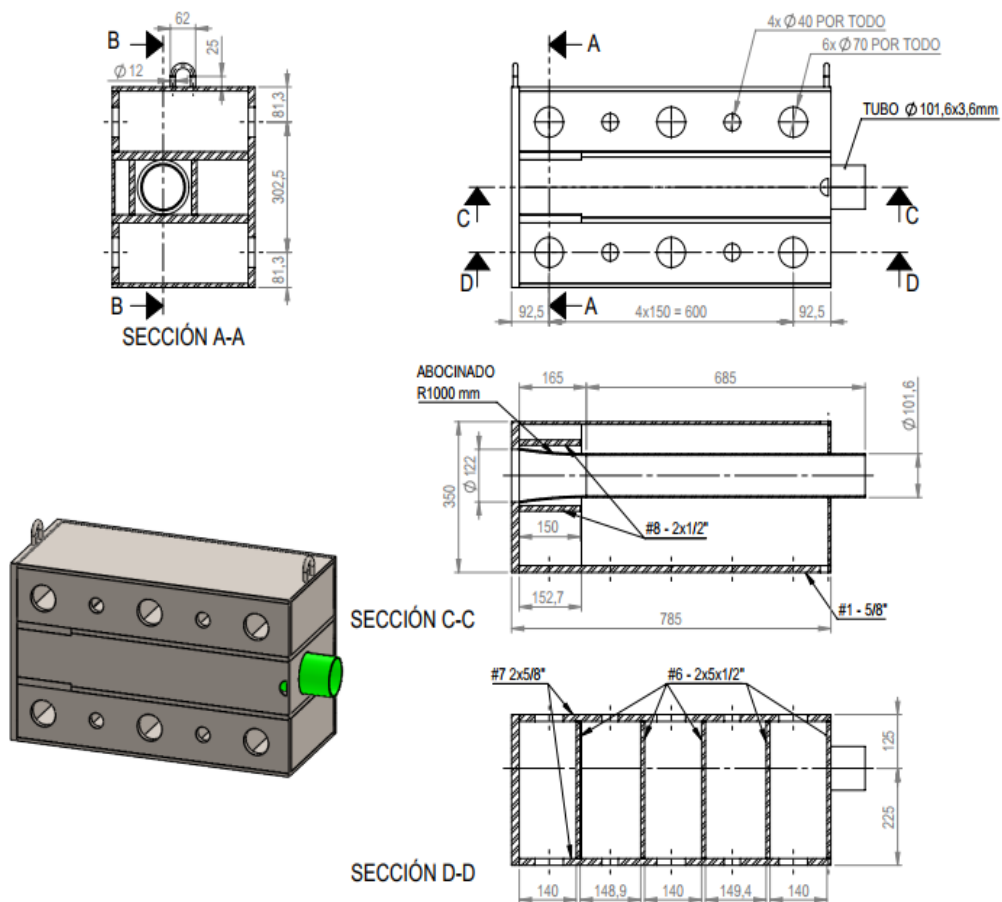


Figura 24. Ménsulas de anclaje

5.b.2.- MONTAJE MÉNSULAS DE ANCLAJES EXTREMOS



Figura 25. Replanteo de perforaciones



Figura 26. Ejecución de perforaciones



Figuras 27. Extracción de testigos con interferencias



Figuras 28. Montaje de los dispositivos



Figura 29. Ajuste por tesado transversal de las barras (Freyssibar FB50) de fijación

5.b.3.- DESVIADORES EN TERCIOS DEL TRAMO



Figura 30. Vista general

5.b.4.- MONTAJE Y TESADO DE LOS CABLES



Figura 31. Unión de las vainas de PEAD



Figura 32. Montaje de vainas de PEAD



Figura 33. Enhebrado los cordones envainados



Figura 34. Extremo de cable (12 cordones)

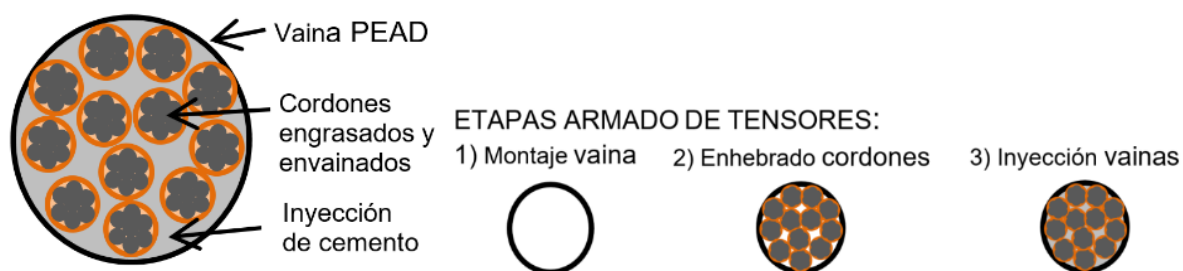


Figura 35. Configuración de cada cable antes de la puesta en carga

Vistas generales



Figura 36. Bloque de anclaje y cuñas colocadas



Figura 37. Tesado unifilar del cable



Figuras 38-39. Vista de tensores colocados no tesados



Figura 40. Vista Norte de los cables ya tesados



Figura 41-42. Vista inferior y sur de los cables tesados

El Sistema de Anclajes Freyssinet (block, cuñas y cordones) queda protegido por capots metálicos con inyección de grasa.



Figura 43-44. Anclaje c/ capots de protección de barras transversales y cordones colocados

5.b.5.- TESADO - PUESTA EN CARGA DE SISTEMA

Se llevó adelante la puesta en carga del sistema por escalones de a 2 x 2 cordones por viga, y repetir el esquema hasta alcanzar la totalidad de cordones por viga

Analizando durante el tesado la respuesta del tablero a través de los desplazamientos verticales (recuperación) en el centro de luz, creímos conveniente terminar esta etapa de introducción de carga según lo expresado en el escalón N° 4 en Vigas N° 1 a 3 con 16 cordones tesados y Viga N° 4 con 12 cordones tesados, recordemos que la disponibilidad por viga es de 24 cordones.

Sin más razón que la prudencia y conociendo que hemos usado el 62,5 % (60 cordones de 96) del sistema instalado, decidimos dar por finalizada la etapa de refuerzo y monitorear su evolución en el tiempo a través de una nivelación en calzada y de ser necesario en el futuro activar el 37,5 % de los cordones aun no tesados.

Resultados del proceso a través de los desplazamientos en el centro de luz.

.....	
-84	-26

Tabla 5. Recuperación de flechas

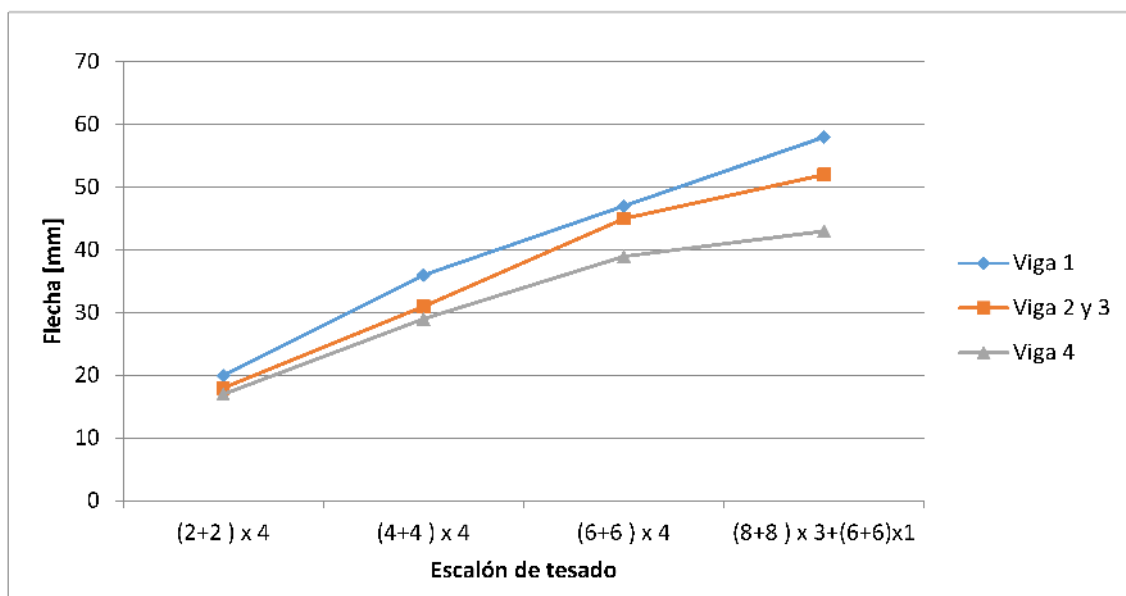


Figura 45. Desplazamientos Verticales durante el Tesado de cordones

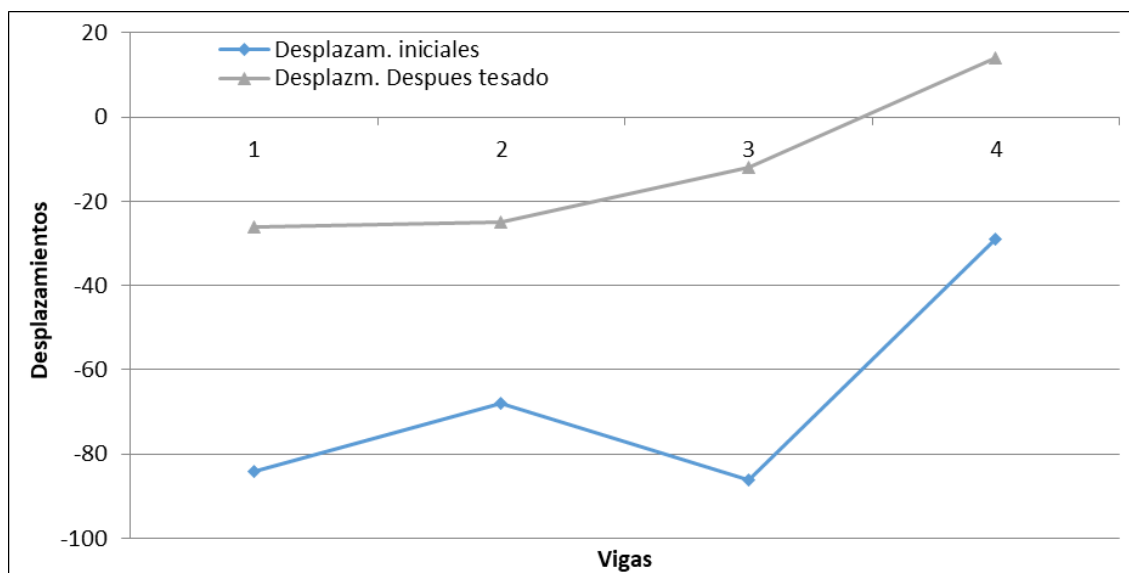


Figura 46. Desplazamientos Verticales antes y después del tesado

Sistemas de medición de deformaciones en fibras inferiores

Los desplazamientos verticales en el centro de tramo de midieron con nivel y regla milimetrada. En fibra inferior de vigas se colocaron dispositivos para monitorear las deformaciones.



Figura 47. Nivelaciones en superficie



Figura 48. Dispositivos en fibras inferiores

6.- MONITOREO POST REPARACIÓN

Desde el 02/04/2019 al 04/05/2019 se realizaron nivelaciones semanales de control, después de liberado el 100 % del tránsito en calzada, sobre los valores de recuperación alcanzados.

Observamos que los valores se mantienen constantes, con una diferencia entre lecturas de ± 1 mm, con respecto a las lecturas obtenidas al finalizar la puesta en carga del sistema, aceptable dado que las condiciones de temperatura no fueron las mismas en cada verificación.

Un Control con lecturas de verificación seis meses después 3/10/2019 arrojó una estabilización a lo largo de todo un año.

Cabe aclarar que los puntos de control sobre calzada en la viga V1 y V4, para controles rápidos, no se corresponden con el relevamiento sobre la deformada de las

vigas ejecutado sobre la fibra inferior con estación total. Este tiene forma lineal ya que por reparaciones en carpeta no es posible tener controles sobre vigas V2 y V3 confiables.

Posteriormente se repitió el monitoreo en los años 2022, 2023 y 2026

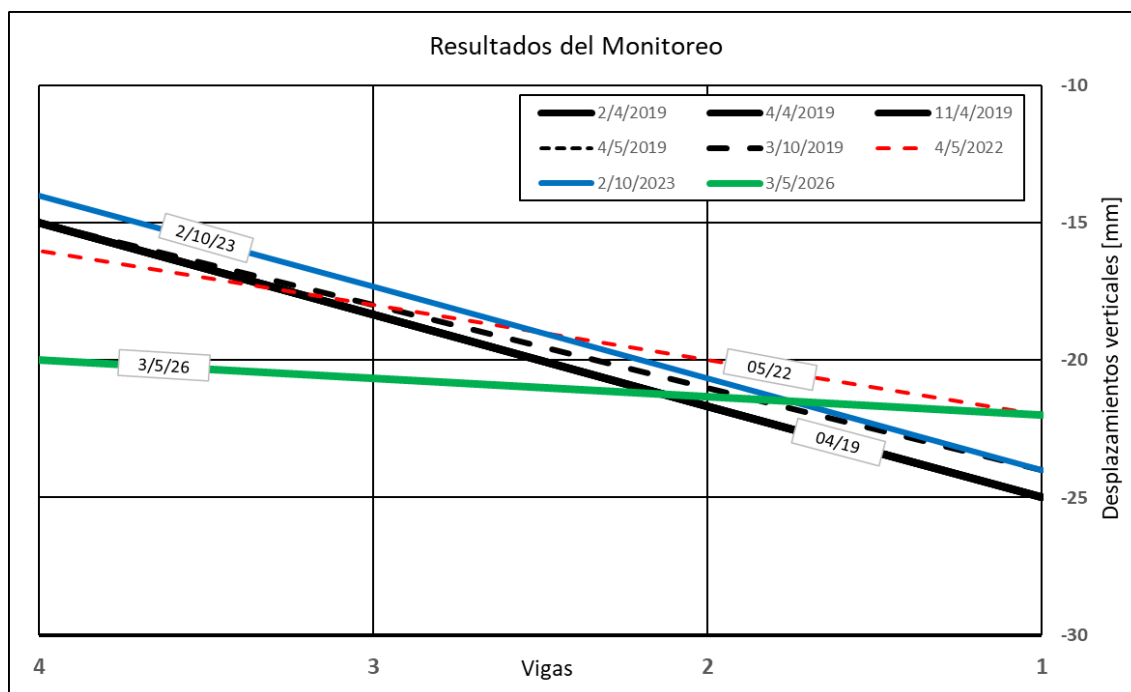


Figura 49. Monitoreos 2019-2026

6.a. - CONCLUSIÓN DEL MONITOREO AL AÑO 2026 (7 años en operación):

Durante los años 2019-2023 el sistema ha oscilado en un entorno de $\pm 3,00$ mm.

El ultimo monitoreo en 2026 (3 años después) muestra un aumento del entorno de $\pm 6,00$ a $9,00$ mm. Mostrando en el reacomodamiento una recuperación en la viga V1, la originalmente más deformada, y un incremento de deformación en la viga V4, la menos deformada originalmente y la menos tesada en la reparación.

Entendemos que, transcurrido un largo periodo se están redistribuyendo las tensiones originales, y rigideces efectivas de los elementos y posiblemente cambiando la distribución de cargas. Recordemos que la viga V4 recibió el 75% de la carga de tesado exterior respecto a las otras vigas.

Estos resultados no son una alerta de peligro, pero si una sugerencia a retomar un monitoreo coordinado para los próximos años y de frecuencia semestral, para posteriormente concluir si no es necesario activar parte de la reserva de tesado disponible.

7.- OBSERVACIONES DURANTE LA VISITA 05/2026

El estado de los desviadores y anclajes es muy bueno, solo se encuentra una pequeña pérdida de grasa en los capots de protección de los extremos engrasados en algunos tensores.



Figura 50 a 53. Estado de desviadores y anclajes

El tensor aguas abajo de la viga V3 muestra una falla en la vaina de PEAD. No reviste mayor gravedad, pueden observarse los cordones envainados y engrasados sanos, debería repararse.





Figura 54 y 56. Vaina rota en tensor de viga V3

Visualmente, no muestra indicios de desplazamiento no deseados



Figura 57 y 58. Vistas de la calzada

Rosario, Junio 2026