

REDUCCIÓN DE SOBRESPEORES DE PAVIMENTO MEDIANTE
PROCEDIMIENTO DE SUPERFICIE SUAVIZADA ENTRE LAS DESVIACIONES
CONSTRUCTIVAS Y LA RASANTE DE DISEÑO EN LA SUPERESTRUCTURA DE
UN PUENTE

MATEO GARCÍA GIRALDO

Trabajo de maestría

Asesor

John Jairo Agudelo Ospina

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2025

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	3
LISTA DE TABLAS.....	5
Resumen	6
0. JUSTIFICACIÓN.....	7
1. ANTECEDENTES.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	11
4. OBJETIVOS.....	12
4.1. GENERAL.....	12
4.2. ESPECÍFICOS.....	12
5. METODOLOGÍA.....	13
6. CRONOGRAMA.....	15
7. PRESUPUESTO.....	16
8. CASOS DE ESTUDIO.....	17
8.1 CASO DE ESTUDIO 1.....	17
8.2 CASO DE ESTUDIO 2.....	24
8.3 CASO DE ESTUDIO 3.....	34
8.4 CASO DE ESTUDIO 4.....	41
9. CONCLUSIONES.....	48
10. RECOMENDACIONES.....	50
REFERENCIAS.....	51
ANEXOS.....	55
ANEXO 1. PROCEDIMIENTO PARA CREACIÓN Y COMPARACIÓN DE SUPERFICIE ENVOLVENTE.....	55

LISTA DE FIGURAS

<i>Fig. 1. Metodología trabajo de maestría.</i>	14
<i>Fig. 2. Cronograma para caso de estudio.</i>	15
<i>Fig. 3. Diagrama de Gantt caso de estudio.</i>	15
<i>Fig. 4. Distribución del presupuesto.</i>	16
<i>Fig. 5. Planta puente caso de estudio 1. Tomado de plano planta perfil del puente.</i>	17
<i>Fig. 6. Perfil puente caso de estudio 1. Tomado del plano planta perfil del puente.</i>	17
<i>Fig. 7. Sección transversal caso estudio 1. Tomado del plano sección general transversal. .</i>	18
<i>Fig. 8. Cierre de voladizos caso de estudio 1.</i>	19
<i>Fig. 9. Perfil longitudinal eje caso de estudio 1.</i>	19
<i>Fig. 10. Perfil longitudinal envolvente eje caso de estudio 1.</i>	20
<i>Fig. 11. Cambio de pendiente alineamientos eje caso de estudio 1.</i>	21
<i>Fig. 12. Perfil longitudinal comparativo diseño superpuesto a máxima desviación caso de estudio 1.</i>	22
<i>Fig. 13. Planta puente caso de estudio 2.</i>	24
<i>Fig. 14. Perfil puente caso de estudio 2.</i>	24
<i>Fig. 15. Sección transversal superestructura puente caso de estudio 2.</i>	25
<i>Fig. 16. Perfil longitudinal eje calzada derecha caso de estudio 2.</i>	25
<i>Fig. 17. Perfil longitudinal eje calzada izquierda caso de estudio 2.</i>	26
<i>Fig. 18. Irregularidades tablero caso de estudio 2.</i>	26
<i>Fig. 19. Perfil longitudinal envolvente calzada derecha caso de estudio 2.</i>	27
<i>Fig. 20. Perfil longitudinal envolvente calzada izquierda caso de estudio 2.</i>	28
<i>Fig. 21. Cambio de pendiente longitudinal eje calzada derecha caso de estudio 2.</i>	29
<i>Fig. 22. Cambio de pendiente longitudinal eje calzada izquierda caso de estudio 2.</i>	29
<i>Fig. 23. Perfil longitudinal comparativo acabado real pavimento vs envolvente calzada derecha caso de estudio 2.</i>	31
<i>Fig. 24. Perfil longitudinal comparativo acabado real pavimento vs envolvente calzada izquierda caso de estudio 2.</i>	32
<i>Fig. 25. Planta puente en vigas postensadas y losa caso de estudio 3.</i>	34
<i>Fig. 26. Perfil en alzada puente caso de estudio 3.</i>	35
<i>Fig. 27. Sección transversal típica caso de estudio 3.</i>	35
<i>Fig. 28. Obra falsa para caso de estudio 3.</i>	36
<i>Fig. 29. Perfil longitudinal eje acabado real vs diseño caso de estudio 3.</i>	36
<i>Fig. 30. Perfil longitudinal eje para envolvente caso de estudio 3.</i>	38
<i>Fig. 31. Comparativo cambio de pendiente longitudinal envolvente vs acabado real caso de estudio 3.</i>	39
<i>Fig. 32. Perfil longitudinal comparativo diseño superpuesto a máxima desviación caso de estudio 3.</i>	40
<i>Fig. 33. Vista alzada en perfil puente caso de estudio 4.</i>	42
<i>Fig. 34. Sección transversal típica caso de estudio 4.</i>	42
<i>Fig. 35. Vista en planta puente caso de estudio 4.</i>	42

Fig. 36. Perfil longitudinal eje a nivel de concreto caso de estudio 4. 43
Fig. 37. Perfil longitudinal envolvente caso de estudio 4. 44
Fig. 38. Cambio de pendiente longitudinal a lo largo del eje caso de estudio. 45
Fig. 39. Perfil longitudinal comparativo entre el acabado real de pavimento y la envolvente propuesta caso de estudio 4. 46

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Presupuesto para trabajo de maestría.	16
<i>Tabla 2.</i> Irregularidades tablero caso de estudio 1.....	20
<i>Tabla 3.</i> Comparación superficie eje acabado real vs envolvente caso de estudio 1.	21
<i>Tabla 4.</i> Espesores carpeta de rodadura rasante de diseño superpuesta caso de estudio 1.	23
<i>Tabla 5.</i> Espesores de carpeta de rodadura propuesta envolvente caso de estudio 1.	23
<i>Tabla 6.</i> Comparativo envolvente vs superposición rasante diseño caso de estudio 1.	23
<i>Tabla 7.</i> Comparación cambio de pendientes acabado real vs envolvente calzada derecha.	30
<i>Tabla 8.</i> Comparación cambio de pendientes acabado real vs envolvente calzada izquierda.	30
<i>Tabla 9.</i> Espesores carpeta de rodadura acabado real calzada derecha caso de estudio 2.	32
<i>Tabla 10.</i> Espesores carpeta de rodadura envolvente propuesta calzada derecha caso de estudio 2.	33
<i>Tabla 11.</i> Espesores carpeta de rodadura acabado real calzada izquierda caso de estudio 2.	33
<i>Tabla 12.</i> Espesores carpeta de rodadura envolvente propuesta calzada izquierda caso de estudio 2.	33
<i>Tabla 13.</i> Comparativo envolvente vs acabado real pavimento calzada derecha caso de estudio 2.	34
<i>Tabla 14.</i> Comparativo envolvente vs acabado real pavimento calzada izquierda caso de estudio 2.	34
<i>Tabla 15.</i> Desviaciones constructivas caso de estudio 3.	37
<i>Tabla 16.</i> Comparación superficie eje acabado real vs envolvente caso de estudio 3.	39
<i>Tabla 17.</i> Espesores carpeta de rodadura rasante de diseño superpuesta caso de estudio 3.	40
<i>Tabla 18.</i> Espesores carpeta de rodadura envolvente caso de estudio 3.	41
<i>Tabla 19.</i> Comparativo envolvente vs superposición rasante diseño caso de estudio 3.	41
<i>Tabla 20.</i> Irregularidades tablero caso de estudio 4.....	43
<i>Tabla 21.</i> Comparativo superficie eje acabado real vs envolvente caso de estudio 4.	45
<i>Tabla 22.</i> Espesores de carpeta de rodadura acabado real pavimento caso de estudio 4.....	46
<i>Tabla 23.</i> Espesores de carpeta de rodadura propuesta envolvente caso de estudio 4.	47
<i>Tabla 24.</i> Comparativo envolvente vs pavimento real caso de estudio 4.....	47
<i>Tabla 25.</i> Resumen de resultados casos de estudio.	48

Resumen

Las obras de infraestructura son vitales para la comunicación de las regiones y territorios; por esto, es necesario que tanto sus diseños como su construcción sean seguras, funcionales, cómodas y estéticas para los usuarios. Sin embargo, generalmente se presentan desviaciones constructivas con respecto al diseño original, inherentes al ser humano u otros factores, como lo pueden ser, climáticos, de sitio, tecnológicos, etc. Las normas de diseño contemplan tolerancias para estas desviaciones, no obstante, usualmente no presentan una solución para casos dónde se supere el error permisible y para el ámbito de los puentes es muy común encontrarse con este tipo de escenarios ya que son estructuras con grados de flexibilidad elevados y eso conlleva a mayor susceptibilidad a las deformaciones. Lo que se propone para estos casos con desviaciones estéticas en la superestructura, que no impliquen detrimento funcional, es generar una superficie suavizada, que se adapte al acabado constructivo y a su vez a la rasante de diseño, de manera que se conserve la estética y confort al transitar por el puente. Esta superficie, tipo envolvente, propende disminuir sobreespesores de carpeta donde no se requieran, evitando mayor carga muerta, sobrecostos y matizando los elementos complementarios, como las barreras o barandas.

Palabras clave: *Superestructura, Rasante, Sobreespesor, Envolvente, Acabado constructivo.*

0. JUSTIFICACIÓN

Con el paso de los años, se ha perfeccionado más el diseño de los puentes, llevándolos a ser cada día, más grandes, largos, esbeltos, ligeros y estéticos. Esto ha sido un gran reto para los constructores, que han tenido que pasar a mayores controles y métodos más estructurados para llevar a cabo la materialización del proyecto y mitigar las causas de las desviaciones constructivas [1]. Lo anterior es fundamental, ya que unos buenos controles durante la ejecución no solo garantizan la integridad de la estructura, sino que prolongan su vida útil [2]. Como parte de estas buenas prácticas [3], menciona la realidad virtual, como una herramienta para comprender de mejor manera el procedimiento constructivo de los puentes y anticiparse a posibles problemáticas en la ejecución, desde su fase de diseño.

También, se han planteado ecuaciones mediante la implementación de modelos en elementos finitos, que permiten estimar la contraflecha o deflexión que irá adquiriendo el puente a lo largo de su proceso constructivo, [4], [5].

No obstante, los desafíos y variables que se presentan a lo largo de la ejecución del puente seguirán estando presentes pese a las ayudas tecnológicas. Por ejemplo, el factor clima es fundamental a la hora de llevar a cabo un proyecto, pero que no puede ser controlado por el hombre. Por motivos de seguridad, en condiciones de lluvia severa, tormentas eléctricas o nevada, no pueden realizarse labores críticas en alturas ni fundidas de concreto. Una situación así puede conllevar a la suspensión de una obra, por tiempo indefinido. Esto en el caso de los puentes puede ser crítico, ya que independientemente de la tipología de este, la variable tiempo incide directamente en la deformación acumulativa de la estructura antes de alcanzar su cierre, como lo explica [6].

Otra manera de influir el clima como condicionamiento local, a parte de las tempestades, es la temperatura; esta también repercute significativamente en las deformaciones y esfuerzos de las estructuras durante su construcción, sobre todo en las esbeltas y flexibles, como es el caso de la mayoría de los puentes, [5], [7], [8], [9], [10], [11], comentan la importancia de controlar los gradientes térmicos generados por exposición a la radiación solar en contraste con la sombra.

Solo por mencionar las anteriores, como ejemplos de influencias externas, ajenas a la controlabilidad humana.

Es preciso destacar, que el puente durante su fase constructiva se encuentra más vulnerable a agentes externos e internos, ya que su factor de seguridad es mucho menor hasta que logre alcanzar el cierre estructural, con un agravante, mientras más avanza el desarrollo constructivo y se acerca al empalme o culminación de la luz, menor estabilidad tendrá, como lo plantea [12].

Teniendo lo anterior claro, es vital el control y monitoreo a lo largo de las etapas constructivas [13]. Por ende, hay una buena base teórica al respecto, pues es la causa raíz del problema en cuestión [14]. Sin embargo, aun teniendo en cuenta todas las prevenciones del caso, se siguen presentando desviaciones en el acabado final de la superestructura. De igual manera, si esta ya se encuentra construida y si las deformaciones no conllevan a ninguna afectación

estructural, el puente deberá ser puesto en servicio. Es por esto que es necesario buscar una manera de mitigar las irregularidades obtenidas en la etapa constructiva y matizarlas en una capa de rodadura cómoda, segura y estética para los usuarios; de forma que se asimile al diseño geométrico original. Esta nueva superficie tiene el reto de no conllevar a grandes sobreespesores de carpeta de rodadura para no repercutir en la carga muerta del puente, ni en el presupuesto por mayores costos de material asfáltico, pero que logre las bondades anteriormente descritas. La propuesta de superficie se buscará tomando casos de estudio de puentes en voladizos sucesivos, viga cajón y vigas postensadas, analizados con la ayuda del programa tipo CAD, “Civil 3D”.

1. ANTECEDENTES

Desde la década de los 50's se han logrado grandes avances en el diseño de puentes, pasando de concreto simplemente reforzado a refuerzo activo mediante sistemas de pre y postensado, los cuales aumentan la eficiencia de la estructura, permitiendo mejores prestaciones mecánicas, mayor esbeltez y menor consumo de materiales [15].

Los puentes modernos solventan mayores luces y son más estéticos, pues más allá de comunicar dos puntos, terminan siendo icónicos y representativos de la región donde se ubican. Estas cualidades anteriores suponen grandes desafíos de diseño y constructivos [16], [17]. Por esto, se han tomado alternativas para perfeccionar y aterrizar mejor las modelaciones estructurales como lo son programas basados en elementos finitos "FEM" para el diseño inicial, así como, la retroalimentación en tiempo real de éstos, mediante parámetros determinados en mediciones de campo logrando así resultados más acertados con la realidad constructiva [18], [19], [20], [21], [22]. Lo anterior también se complementa con programas que permiten la metodología BIM para el modelado 3D de la estructura facilitando la comprensión de los diseños por parte del constructor [23].

Además, se han implementado herramientas tecnológicas en campo para facilitar las mediciones, frecuencia y el monitoreo en la construcción, [24], [25] explican la utilización de drones combinados con tecnología LiDAR y RGB, para obtener información del estado del puente a lo largo de sus etapas constructivas u operativas, facilitando así las correcciones y toma de decisiones durante el proceso.

De igual manera, se siguen utilizando los métodos más tradicionales para el control de las deflexiones en cada uno de los segmentos de un puente a través de mediciones y puntos estandarizados de referencia con estación total y nivel de precisión. Usando los datos recolectados en los segmentos anteriores para predecir el comportamiento del próximo tramo a fundir, con la ayuda de software, y de esta manera mitigar las desviaciones geométricas y posicionales [26]. Complementando lo anterior [15], identifica que el control debe de realizarse en tres etapas críticas de cada segmento: durante la colocación del concreto, durante el tensionamiento y cuando se va a posicionar el carro de avance o sistema de encofrado utilizado para el siguiente segmento.

Finalmente, otro avance importante ha sido la implementación más frecuente de elementos prefabricados que permiten controlar de mejor manera los estándares de calidad y aumentan la velocidad de construcción [5], [17].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mejor manera para mitigar las desviaciones en el acabado de la superestructura es implementar controles a la hora de realizar los procedimientos constructivos, teniendo especial cuidado en los puentes con grandes luces, en donde una corrección continua mediante la identificación de las desviaciones en cada tramo construido puede permitir el balanceo de estos desniveles a medida que se avanza a lo largo de la luz y así lograr un mejor cierre [27]. Una buena manera de realizar este seguimiento es propuesta en [28].

No obstante, también es sabido que, pese a las diferentes maneras de realizar controles de las variables influyentes a lo largo de la construcción de la superestructura, luego del cierre del puente, cuando se realice el último tensionamiento es posible que también se generen deformaciones [15]. Lo anterior es debido a la variabilidad en los diseños de los puentes, por lo que no todos tienen el mismo comportamiento esperado, ya sea por factores como el peso propio, la rigidez, el preesfuerzo, factores ambientales, metodología constructiva, etc. [29].

Por esto, resulta fundamental desarrollar una propuesta de superficie que permita mitigar estas desviaciones en la última instancia cuando el tablero ya está terminado y se deba instalar la capa de rodadura, que, de no corregirse la superficie final, podrá ser irregular, impactando en el confort de los usuarios [30], o si se intenta llevar al acabado de diseño, habrá partes con mayores espesores lo cual impacta en la carga muerta estimada inicialmente.

Esta nueva superficie debe ser optimizada ya que, generalmente, lo realizado constructivamente es aumentar el espesor del pavimento con el fin de que el sitio con mayor irregularidad cumpla con la capa mínima y, de allí, partir a sobreponer la rasante de diseño original. Sin embargo, esto lleva a mayor peso por carga muerta y un sobre costo por materiales, al ser una alternativa forzada y que en la mayoría de los casos no se adapta a la realidad constructiva. Es ahí donde, con la ayuda de programas tipo CAD, se puede plantear una nueva superficie final que sea intermediaria entre el acabado real y la rasante de diseño, de manera que se llegue a una nueva cartera de cotas de acabado de pavimento para lograr una rodadura cómoda, segura y estética para los usuarios. Esta nueva superficie también sería la base para la construcción de elementos complementarios, como las barreras de tráfico. Para lo anterior se analizarán datos reales de puentes de tipología voladizos sucesivos, viga cajón y vigas postensadas, de modo que se puedan evaluar las diferencias entre acabado real, rasante de diseño y cómo se pudo haber mejorado el espesor de la capa de rodadura y el alineamiento vertical, mediante una nueva propuesta de superficie llamada envolvente.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo mitigar las desviaciones constructivas en la superestructura de un puente ajustando la geometría real a la superficie de diseño sin generar sobreespesores de pavimento ni sobrecostos de construcción?

4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

Mitigar las desviaciones constructivas en la superestructura de puentes mediante un procedimiento que permita obtener superficies de rasante que se asimilen al diseño original, mejorando la uniformidad del trazado, reduciendo sobreespesores de pavimento y sobrecostos constructivos.

4.2. ESPECÍFICOS

- Analizar información real de campo para puentes en voladizos sucesivos, viga cajón y vigas postensadas, mediante graficas de perfiles verticales reales y de diseño, que permitan comparar los resultados con ayuda de programas tipo CAD.
- Implementar un procedimiento que permita mejorar el alineamiento vertical en la rasante real construida, a través de unas líneas guías base, para una geometría suavizada en la carpeta de rodadura, utilizando el programa Civil 3D.
- Reducir espesores de carpeta asfáltica en comparación con la solución pragmática de la superposición de la superficie de diseño al máximo error constructivo.

5. METODOLOGÍA

Con el fin de lograr los objetivos anteriormente descritos, se realizará un análisis cuantitativo de las variables cota de rasante y espesor de pavimento para cuatro casos de estudio en puentes en tipo: voladizos sucesivos (2), viga cajón (1) y vigas postensadas (1). Con dicha información de campo, se graficará en el programa Civil 3D los perfiles verticales de acabado real y rasante de diseño original, evaluando numéricamente las desviaciones constructivas de esos casos, así como cuál fue el espesor de pavimento implementado. A partir de esos análisis, se propondrá una alternativa de rasante envolvente para cada caso, que mitigue dichas irregularidades geométricas y que, a su vez, genere menores sobreespesores de pavimento con respecto a la solución que se tuvo en su momento en cada uno de ellos. Para esto, usando el perfil longitudinal por el eje de cada calzada y teniendo como punto de partida la superficie de acabado real, el diseño original y dos líneas guías de offset paralelas del acabado real de superficie, una al mínimo espesor deseado y otro al máximo esperado para la carpeta; se trazará con la ayuda del software el nuevo alineamiento vertical, de manera que se adapte al acabado real, pero que matice sus irregularidades, sin salirse de un espesor mínimo y propendiendo no superar el máximo establecido.

Finalmente, se contrastarán los resultados y se propondrán recomendaciones para poder llegar a un procedimiento que logre una superficie envolvente para la superestructura de manera generalizada. El procedimiento más detallado, junto con su paso a paso, se encuentra en el *Anexo 1*.

En la Fig. **1**, se resumen la secuencia de la metodología.



Fig. 1. Metodología trabajo de maestría.

6. CRONOGRAMA

Con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos en el tiempo estipulado para el trabajo de grado, se realiza un cronograma de las actividades. Para la elaboración de este, se utilizó la ayuda de MS Project, ver Fig. 2 y Fig. 3.

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
▣ Trabajo de maestría	195 días	lun 27/01/25	vie 24/10/25	
Inicio de trabajo	0 días	lun 27/01/25	lun 27/01/25	
Antecedentes	45 días	lun 27/01/25	vie 28/03/25	2
Recolección de información	45 días	lun 31/03/25	vie 30/05/25	3
Análisis de información	30 días	lun 2/06/25	vie 11/07/25	4
Desarrollo de propuesta	50 días	lun 14/07/25	vie 19/09/25	5
Evaluación de resultados	15 días	lun 22/09/25	vie 10/10/25	6
Conclusiones	10 días	lun 13/10/25	vie 24/10/25	7
Fin del trabajo	0 días	vie 24/10/25	vie 24/10/25	8

Fig. 2. Cronograma para caso de estudio.

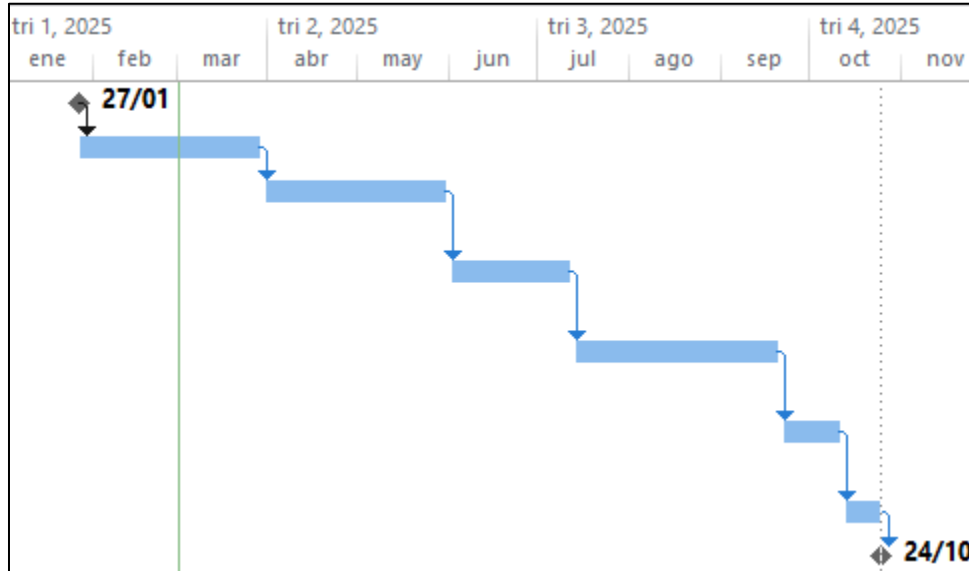


Fig. 3. Diagrama de Gantt caso de estudio.

Con lo anterior, se presenta una duración de 195 días, la cuál es acorde con la duración del programa académico.

7. PRESUPUESTO

Para estimar los costos asociados al trabajo de maestría, a continuación, se resumirá en la *Tabla 1*, el presupuesto inicial planteado.

PRESUPUESTO DE TRABAJO	
Ítem	Valor [COP]
Formación académica	48'321.014
Honorarios de asesor	9'000.000
Disponibilidad personal	15'600.000
Herramientas de informática	4'500.000
Comisión topográfica	8'400.000
Licencia Civil 3D	7'500.000
Total	93'321.014

Tabla 1. Presupuesto para trabajo de maestría.

De igual manera, en la *Fig. 4*, se grafica una distribución porcentual de dicho presupuesto.

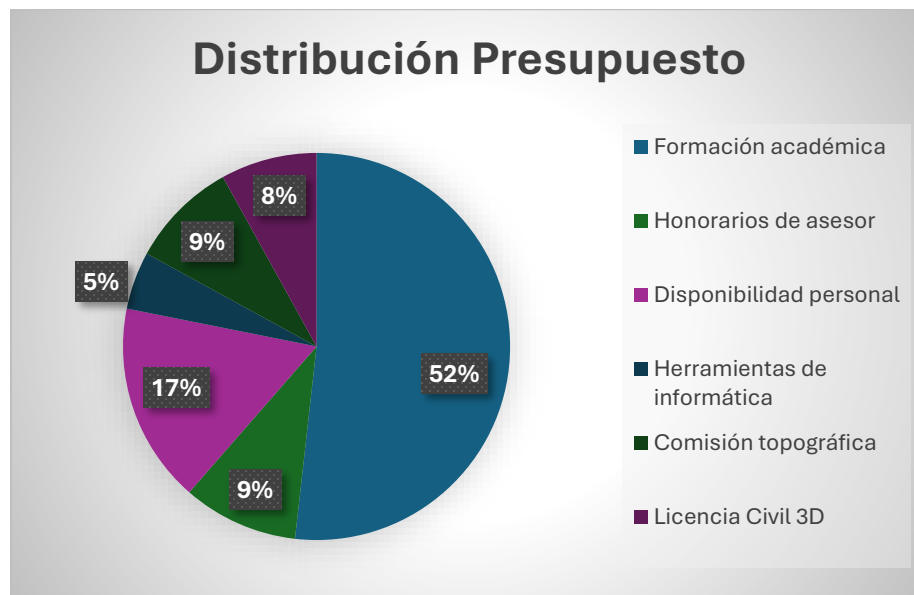


Fig. 4. Distribución del presupuesto.

8. CASOS DE ESTUDIO

8.1 CASO DE ESTUDIO 1

El primer caso de estudio seleccionado para ejemplificar la problemática abordada se trata de un puente en concreto postensado en tipología de voladizos sucesivos, conformado por un tramo en contrapeso y otro balanceado. En la Fig. 5 se ilustra la planta del puente.

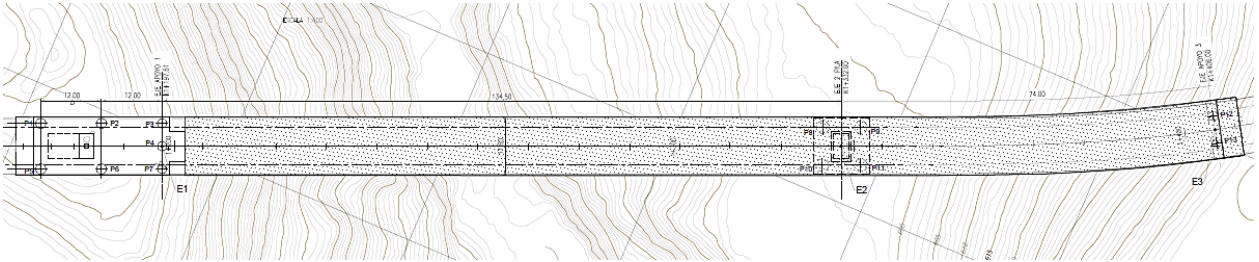


Fig. 5. Planta puente caso de estudio 1. Tomado de plano planta perfil del puente.

El puente tiene una longitud de 234m y un ancho de tablero de 11.60m, su trazado se compone de un tramo recto inicial y una ligera curva horizontal al final. Consta de tres apoyos, siendo el primero el del costado izquierdo de la imagen, el cual corresponde al contrapeso; el apoyo intermedio es una pila de la cual se desprenden los voladizos balanceados y finalmente el apoyo tres es el estribo de cierre del puente. En la Fig. 6 se presenta el perfil de la estructura.

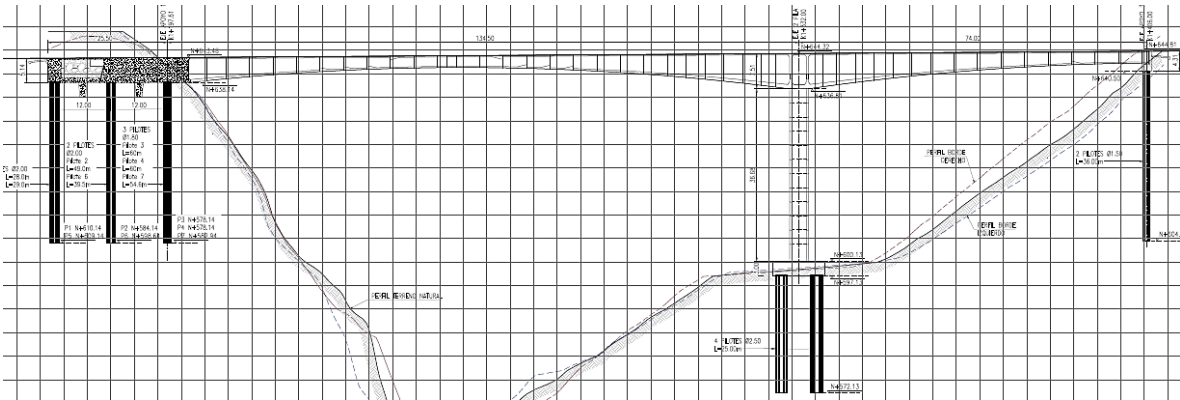


Fig. 6. Perfil puente caso de estudio 1. Tomado del plano planta perfil del puente.

La pendiente en el alineamiento vertical, como es apreciable, no es una variable para tener en cuenta para el ejercicio, ya que no posee cambio de inclinación. La sección transversal es variable en cuanto a la dimensión del cajón, reduciendo su altura a medida que se aproxima al centro de la luz o al estribo en el eje 3. Ver Fig. 7.

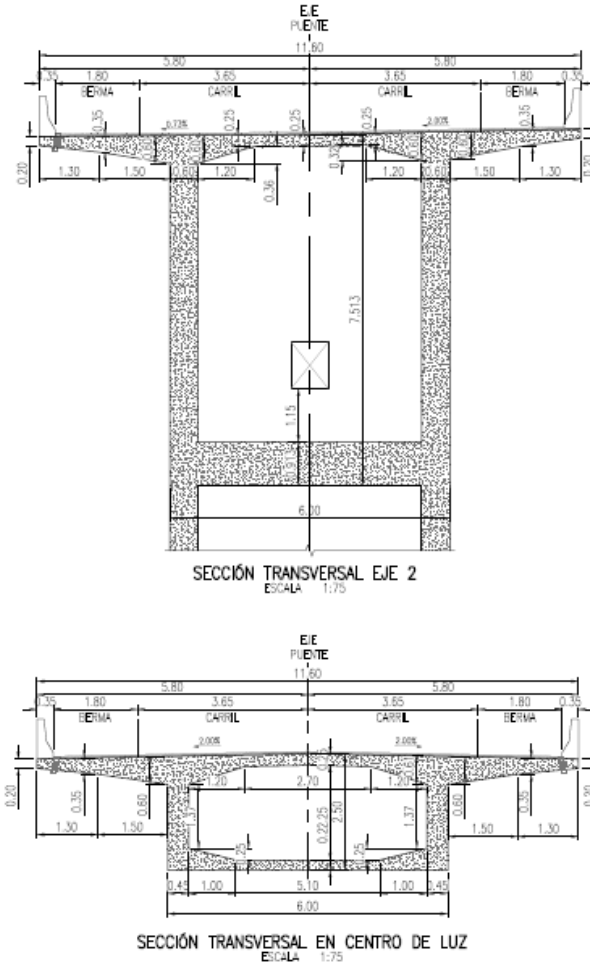


Fig. 7. Sección transversal caso estudio 1. Tomado del plano sección general transversal.

Para la construcción del puente se empleó la metodología de obra falsa a través de carro de avance, es decir, una estructura metálica conformada por perfiles y rieles, la cual se soporta del tramo anteriormente fundido y hace las veces de voladizo para la plataforma de trabajo del próximo tramo de dovela o sección a fundir. De esta manera, se va desplazando a lo largo de la luz, conforme se realizan las dovelas del puente, hasta llegar a la sección de cierre entre voladizos. Ver Fig. 8.



Fig. 8. Cierre de voladizos caso de estudio 1.

Pese a los controles topográficos implementados durante la construcción del puente, se presentaron grandes desviaciones constructivas en la cota de acabado del tablero. Debido a que el motivo de estudio no son las causas de estas desviaciones, sino, llegar a una solución geométrica de rasante para las condiciones reales de acabado, no se ahondará en la explicación de las mismas. A continuación, en la Fig. 9 , se presenta el comparativo entre acabado real y teórico a lo largo del eje del trazado.

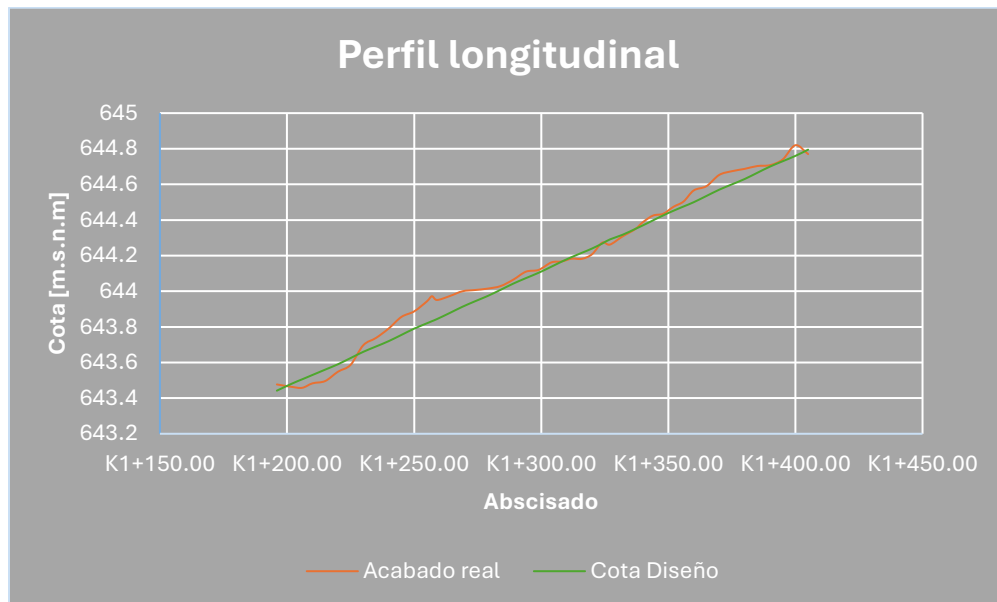


Fig. 9. Perfil longitudinal eje caso de estudio 1.

Como se evidencia, se presenta una gran variación de cotas entre el acabado real del tablero y el valor teórico por diseño, produciéndose irregularidades que deben ser matizadas con el fin de garantizar una comodidad en la transitabilidad, puesto que llegar a los valores de diseño mediante la capa de carpeta asfáltica ya no es factible al distar tanto los valores y varios de estos estar por encima de la rasante teórica. En la *Tabla 2* se presentan los datos característicos de las desviaciones encontradas en el tablero.

Máxima cresta:	14.00	cm
Máxima depresión:	6.40	cm
Irregularidad promedio:	2.83	cm
Desviación promedio:	4.89	cm

Tabla 2. Irregularidades tablero caso de estudio 1.

De acuerdo con los datos anteriores se destaca que se presentó una cresta o protuberancia máxima de 14 cm, así como una depresión de 6.4 cm y una fluctuación promedio entre dovelas de 4.89 cm. Dichas condiciones, anteriormente expuestas, serán el punto de partida para iniciar con un nuevo diseño de alineamiento vertical, el cual permita suavizar estas irregularidades. Aplicando la técnica explicada en la metodología, de las líneas guías de espesor mínimo y máximo deseado, con la ayuda del software se traza el nuevo alineamiento vertical propuesto, el cual toma el nombre de envolvente.

Este ejercicio se realiza a lo largo del eje, así como por el borde lateral derecho e izquierdo, de esta manera se obtiene una cartera completa para plasmar en campo. En la *Fig. 10*, se presenta el perfil longitudinal a lo largo del eje, en donde se suavizaron las irregularidades sin generar un sobre espesor de pavimento excesivo.

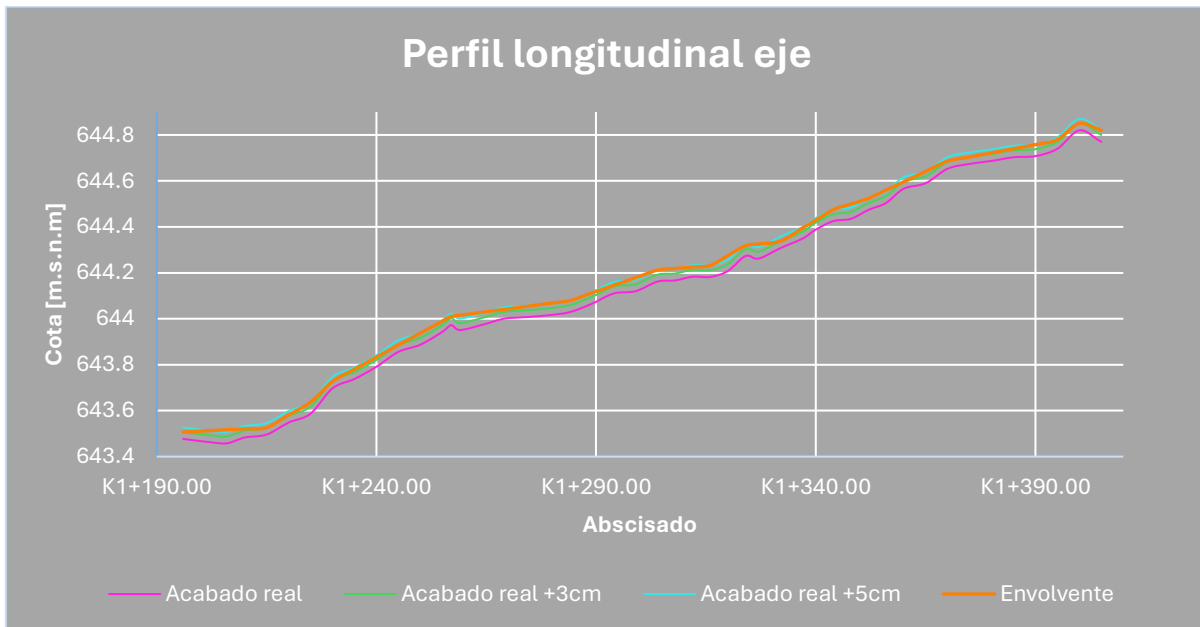


Fig. 10. Perfil longitudinal envolvente eje caso de estudio 1.

Para comprender mejor la diferencia entre la superficie de acabado real y la envolvente propuesta, se muestra a continuación, en la Fig. 11, el cambio de pendiente longitudinal a lo largo del trazado para ambos escenarios.

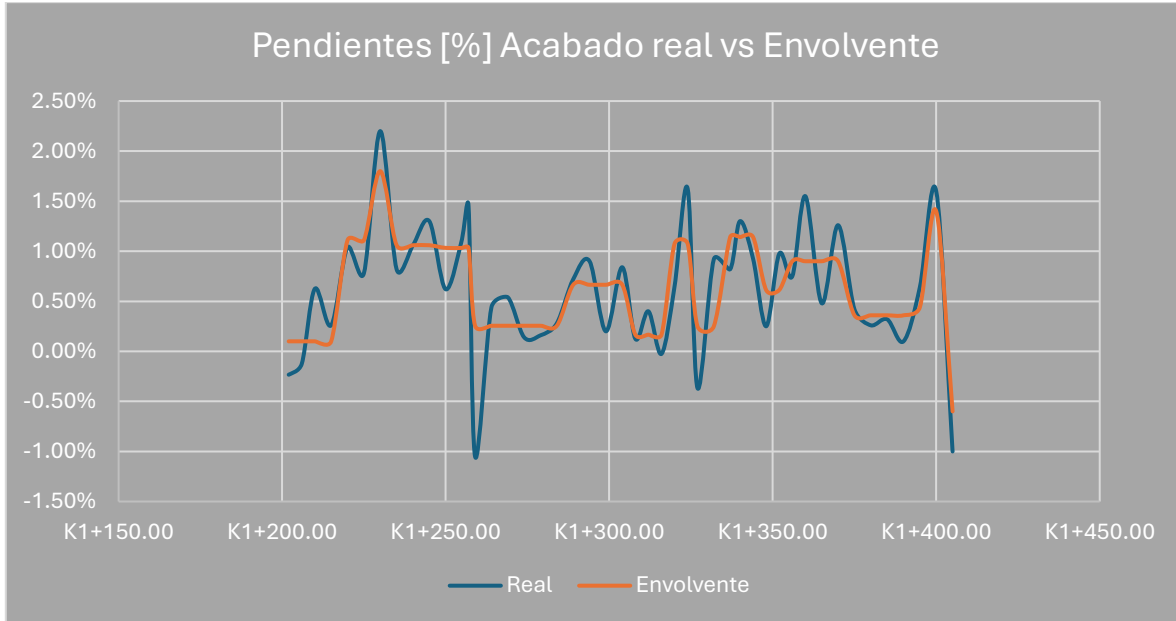


Fig. 11. Cambio de pendiente alineamientos eje caso de estudio 1.

De esta manera, se observan reducciones en puntos críticos de hasta 1.25% en la pendiente longitudinal. A continuación, en la Tabla 3, se exponen los datos estadísticos obtenidos para la comparación de regularidad entre acabado real y la envolvente propuesta. (Entiéndase Δm como el cambio de pendiente longitudinal).

Máximo Δm real:	2.20%	Máximo Δm envolvente:	1.80%
Mínimo Δm real:	-1.05%	Mínimo Δm envolvente:	-0.60%
Δm real promedio:	0.61%	Δm envolvente promedio:	0.63%
Δm real Desviación promedio:	0.64%	Δm envolvente Desviación promedio:	0.46%

Tabla 3. Comparación superficie eje acabado real vs envolvente caso de estudio 1.

De la Tabla 3, se destaca la disminución en los máximos y mínimos de pendiente en valores de 0.4%, así como la reducción en la desviación del cambio de pendiente promedio en 0.18%, permitiendo así mayor regularidad a lo largo del alineamiento, traduciéndose esto en una suavización de las desviaciones alcanzadas en el acabado real de concreto.

Aparte de la bondad de mejorar las desviaciones constructivas, la envolvente también tiene el objetivo de reducir los sobre espesores de pavimento, al ser básicamente un alineamiento adaptado a las condiciones reales de acabado. Generalmente, en el ámbito de la construcción, estas desviaciones cuando llegan a presentarse tratan de ser maquilladas obligando a la cota de cartera del diseño teórico de rasante. Sin embargo, en algunos escenarios, como lo es este caso de estudio, la rasante de acabado real se encuentra superior en nivelación que las cotas teóricas. Es aquí donde, de una manera pragmática, se realiza la nivelación superpuesta de la superficie teórica, llevando las cotas al máximo desnivel de campo creando así una superficie paralela a la de diseño, pero con mayores cotas. Esta práctica, si no es bien analizada, puede conllevar a grandes sobre espesores de carpeta de rodadura, representando así, mayor carga muerta, pudiendo llegar a ser nocivo para la estructura, además de sobrecostos para el proyecto. Para ejemplificar lo anterior, en la **Fig. 12** se presenta la práctica común de superposición de la rasante de diseño al máximo desnivel en campo.

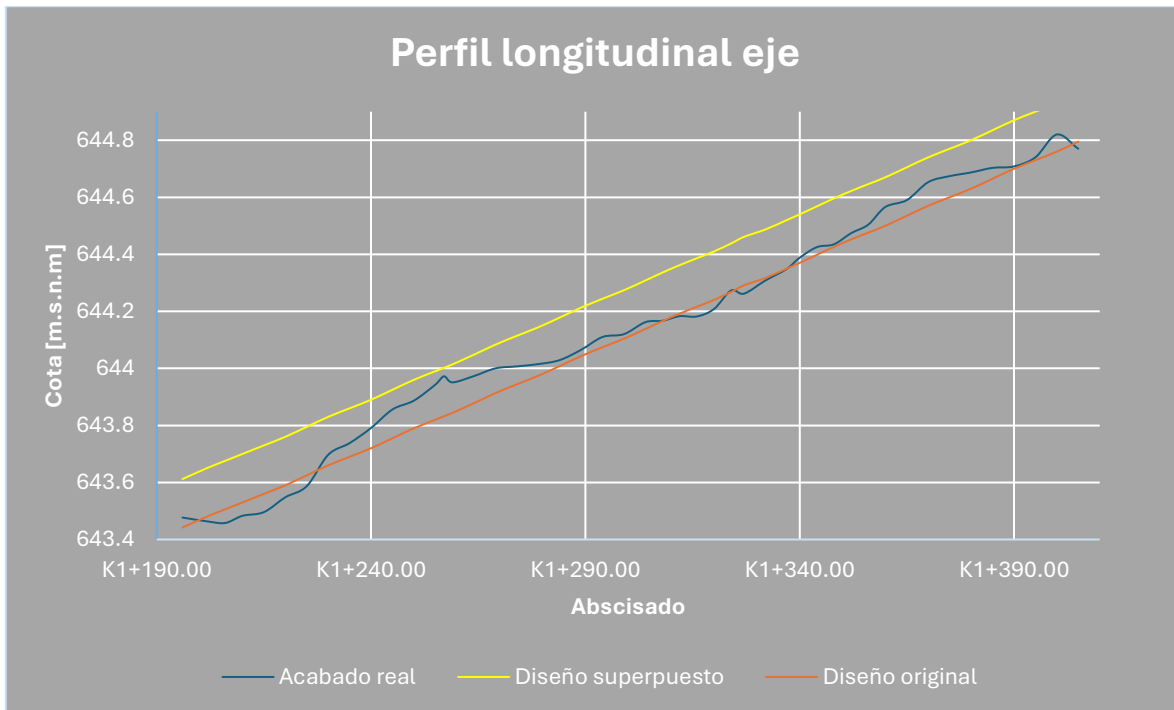


Fig. 12. Perfil longitudinal comparativo diseño superpuesto a máxima desviación caso de estudio 1.

La superposición del perfil ocurre en el K1+257, lugar donde se presenta una pronunciada cresta, de este punto de partida más tres centímetros de espesor mínimo, se realiza la superposición paralela del perfil de diseño. Como se puede apreciar, esta práctica lleva a grandes sobre espesores debido a la irregularidad de la superficie original en donde podría tener un espesor de carpeta de hasta 23.40 cm. Ver la

Tabla 4.

Máximo espesor:	23.40	cm
Mínimo espesor:	3.00	cm
Espesor promedio:	14.17	cm
Desviación promedio:	4.89	cm

Tabla 4. Espesores carpeta de rodadura rasante de diseño superpuesta caso de estudio 1.

Analizando los datos de la tabla anterior, es evidente que la superposición de la rasante de diseño no es la manera adecuada para abordar este caso de estudio, pues no solo llega a tener espesores de 23.40 cm, sino que el promedio de carpeta resultaría de 14.17 cm contra el teórico de 5.00 cm, siendo así, aproximadamente un 180% mayor. Esto llega a ser muy significativo para la carga muerta pudiendo alterar el comportamiento y capacidad resistiva de la estructura, así como económicamente afectaría el presupuesto para la actividad de carpeta asfáltica.

En contraste con el escenario anterior, se presenta en la *Tabla 5*, los espesores alcanzados por la metodología de estudio, es decir, la envolvente, adaptada a las condiciones reales de acabado.

Máximo espesor:	6.70	cm
Mínimo espesor:	3.00	cm
Espesor promedio:	4.49	cm
Desviación promedio:	1.05	cm

Tabla 5. Espesores de carpeta de rodadura propuesta envolvente caso de estudio 1.

Finalmente, en la *Tabla 6* se consignan las diferencias y optimización alcanzada por la metodología de la envolvente vs la superposición de la superficie de diseño.

Reducción máximo espesor:	71%
Reducción en el espesor promedio:	68%
Reducción en la variación promedio:	79%
Reducción en volumen de capa de rodadura:	249.84 m ³
Reducción en peso de capa de rodadura:	549.65 tn
Disminución carga muerta:	244.2%

Tabla 6. Comparativo envolvente vs superposición rasante diseño caso de estudio 1.

Para el caso del peso de la carpeta asfáltica se tomó un valor promedio del peso unitario de una mezcla densa en caliente tipo 19 (MDC-19) de 2.20 tn/m³. Se agrega también como valor comparativo la carpeta de diseño original con los 5 cm de espesor, que da un valor superior a la envolvente, debido a que como se mencionó anteriormente, se tuvo como criterio un espesor mínimo de 3 cm a la hora de trazar el nuevo perfil.

8.2 CASO DE ESTUDIO 2

El segundo caso de estudio se trata de un puente urbano que comprende una curva vertical y horizontal a lo largo del trazado, para garantizar el paso a desnivel. Cuenta con una longitud de 225 m y un ancho de tablero de 16.40 m, para una doble calzada bidireccional. Se soporta en cinco apoyos intermedios y dos estribos en los costados, para un total de seis luces. Ver Fig. 13.

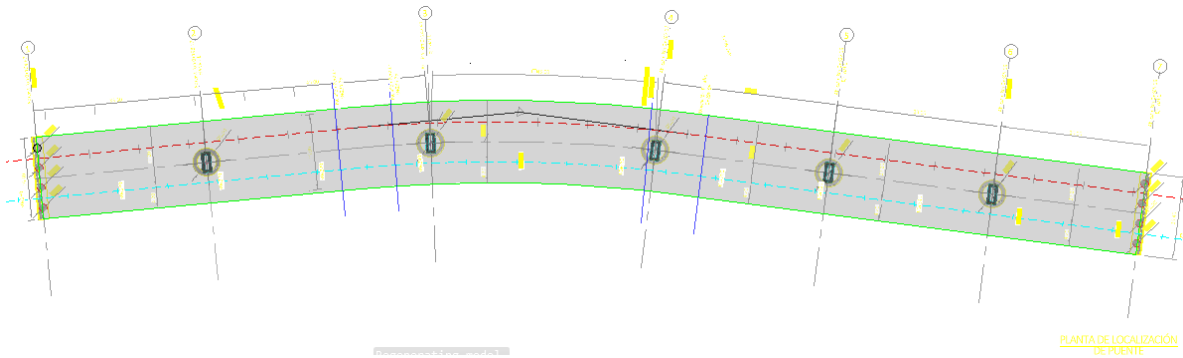


Fig. 13. Planta puente caso de estudio 2.

La curva vertical del trazado está presente a lo largo de todo el desarrollo del tablero del puente, de esta manera, se aborda una condición diferente al caso de estudio 1. Ver Fig. 14.

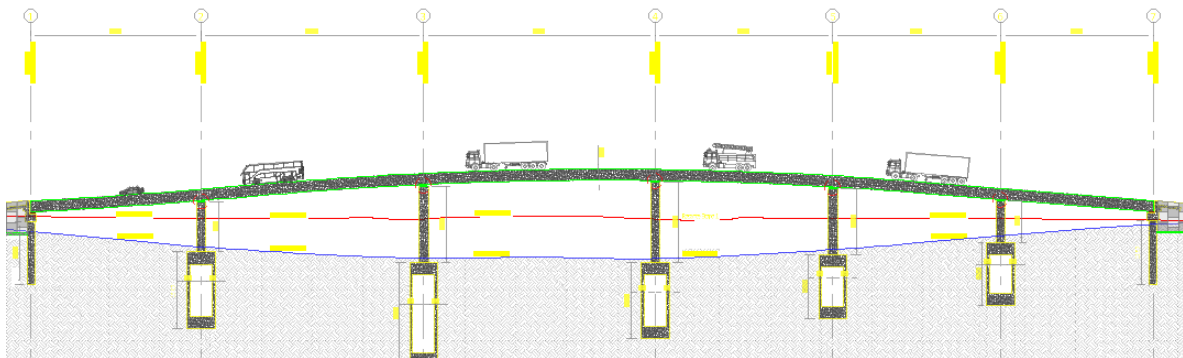


Fig. 14. Perfil puente caso de estudio 2.

En cuanto a la metodología constructiva, también difiere al caso de estudio 1, ya que esta fue mediante obra falsa con andamios de carga, soportados en campo, aprovechando la facilidad de las condiciones de cercanía al suelo de apoyo. La sección de la estructura es tipo viga cajón, de dimensiones constantes, como lo muestra la Fig. 15.

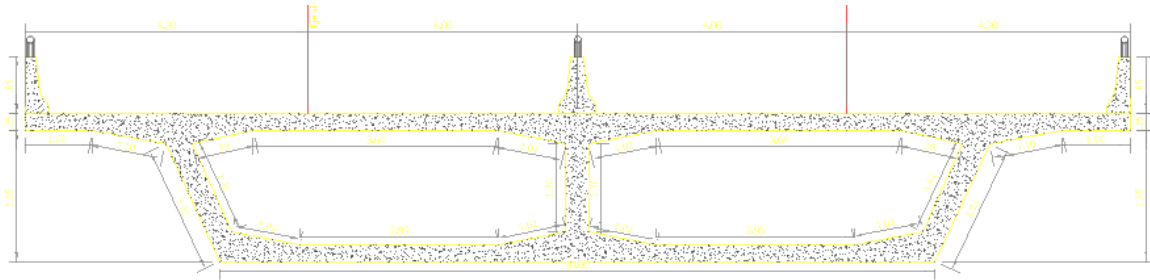


Fig. 15. Sección transversal superestructura puente caso de estudio 2.

Al igual que el caso de estudio anterior, este puente también presentó desviaciones constructivas considerables en su alineamiento vertical, conllevando a diferir con la rasante de diseño original. A continuación, en las Fig. 16 y Fig. 17, se presentan los perfiles verticales a lo largo del eje de las calzadas derecha e izquierda, respectivamente.

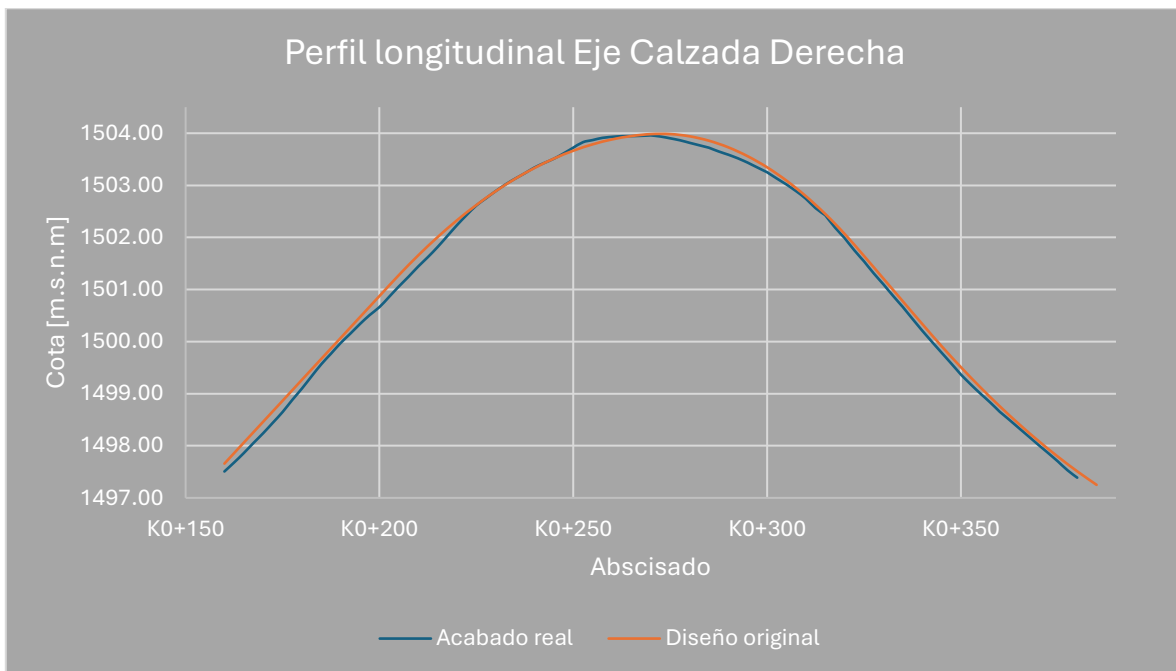


Fig. 16. Perfil longitudinal eje calzada derecha caso de estudio 2.

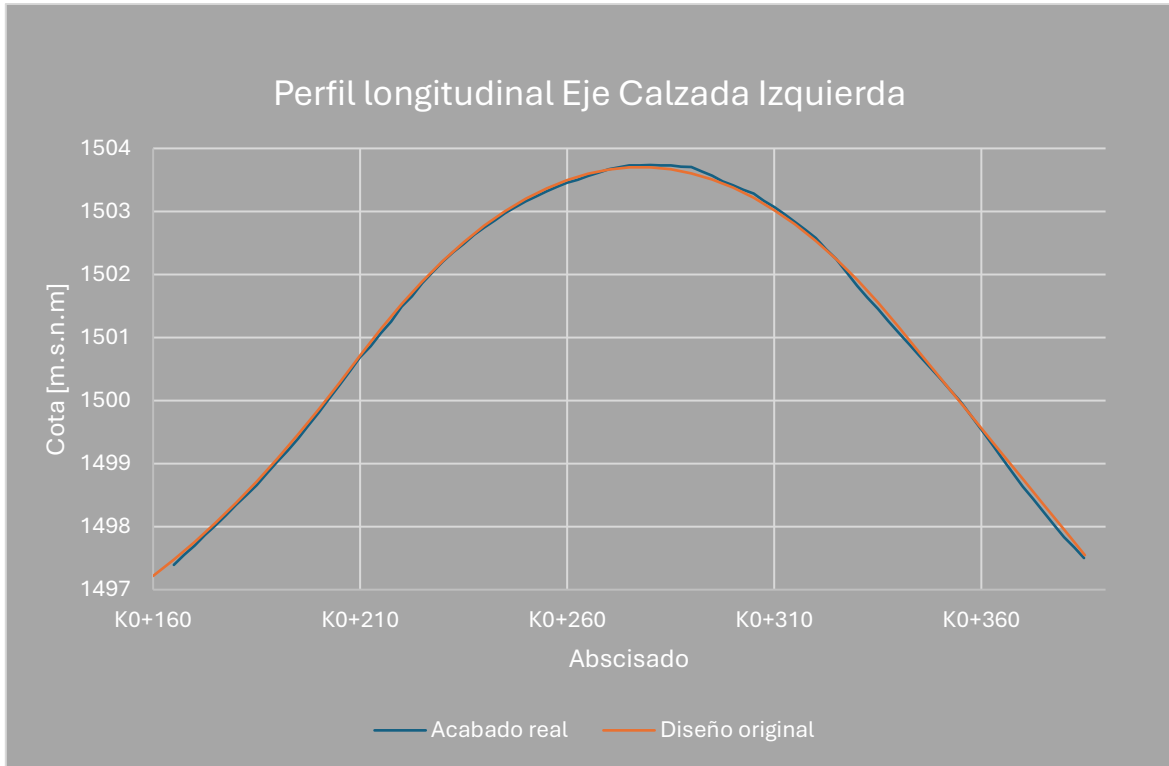


Fig. 17. Perfil longitudinal eje calzada izquierda caso de estudio 2.

De las figuras anteriores, se identifica que el carril derecho fue el que tuvo las mayores desviaciones constructivas. En la Fig. 18 se consignan los datos comparativos entre acabado y diseño.

Calzada derecha			Calzada izquierda		
Máxima cresta:	24.20	cm	Máxima cresta:	15.80	cm
Máxima depresión:	12.10	cm	Máxima depresión:	10.60	cm
Irregularidad promedio:	9.52	cm	Irregularidad promedio:	2.71	cm
Desviación promedio:	8.01	cm	Desviación promedio:	5.97	cm

Fig. 18. Irregularidades tablero caso de estudio 2.

Como se puede observar de los datos en la tabla anterior, se necesita realizar un nuevo diseño ajustado a las condiciones alcanzadas en campo para el acabado del concreto del tablero, pues llegar a las cotas originales teóricas ya es inviable por los sobre espesores que conllevaría en algunos puntos, así como las grandes crestas que sobrepasan el nivel de rasante de diseño. Para esto, se aplica la metodología de envolvente explicada en el caso de estudio 1, pero las líneas guías para el trazado del nuevo alineamiento vertical, esta vez serán el acabado original más 5 cm y otra de 7 cm, de esta manera, se tiene como referencia un espesor mínimo de pavimento de 5 cm para ser acordes con el diseño original. En la Fig. 19 se

muestran las líneas guías y la envolvente propuesta para la calzada derecha, mientras que en la Fig. 20 lo correspondiente para la calzada izquierda.

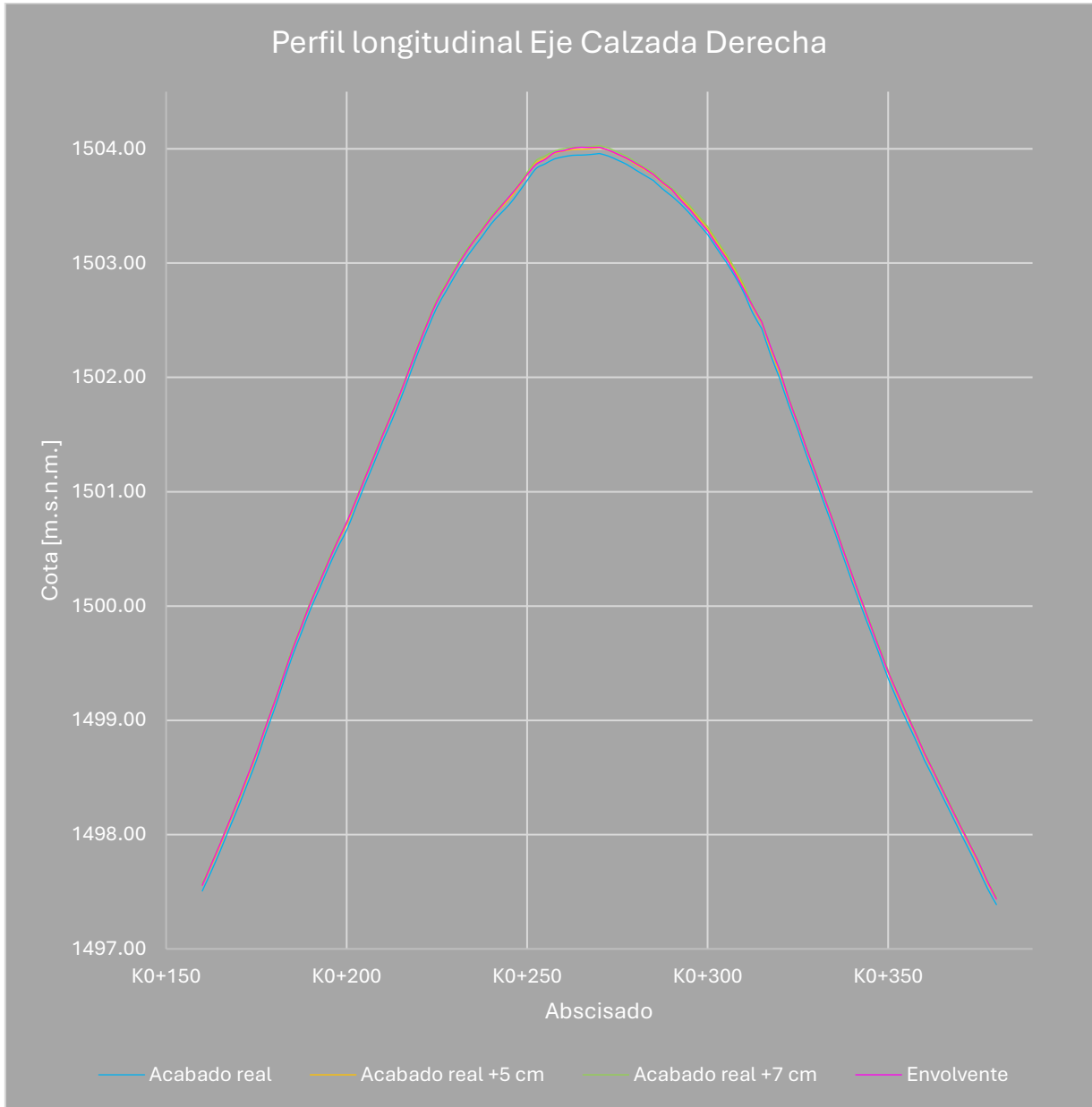


Fig. 19. Perfil longitudinal envolvente calzada derecha caso de estudio 2.

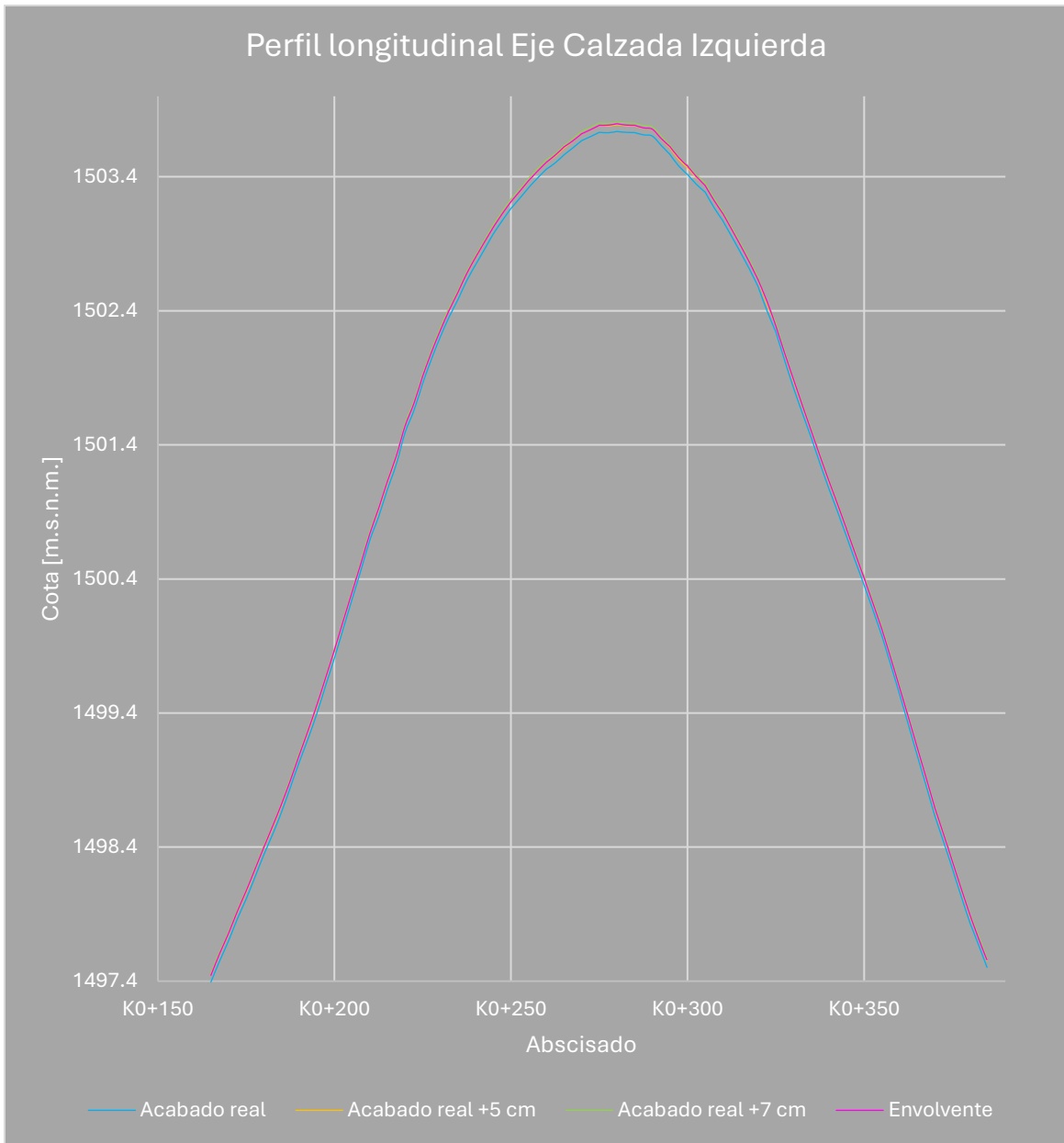


Fig. 20. Perfil longitudinal envolvente calzada izquierda caso de estudio 2.

De igual manera, en las Fig. 21 y Fig. 22, se ilustra el cambio de pendiente longitudinal a lo largo de los ejes para la calzada derecha e izquierda, respectivamente.

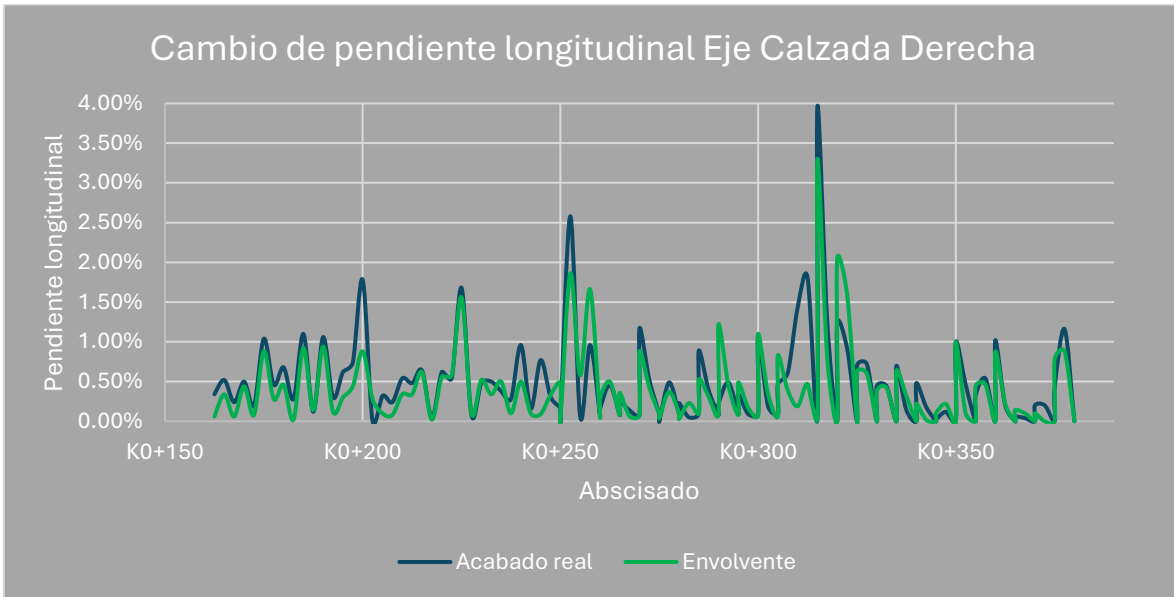


Fig. 21. Cambio de pendiente longitudinal eje calzada derecha caso de estudio 2.

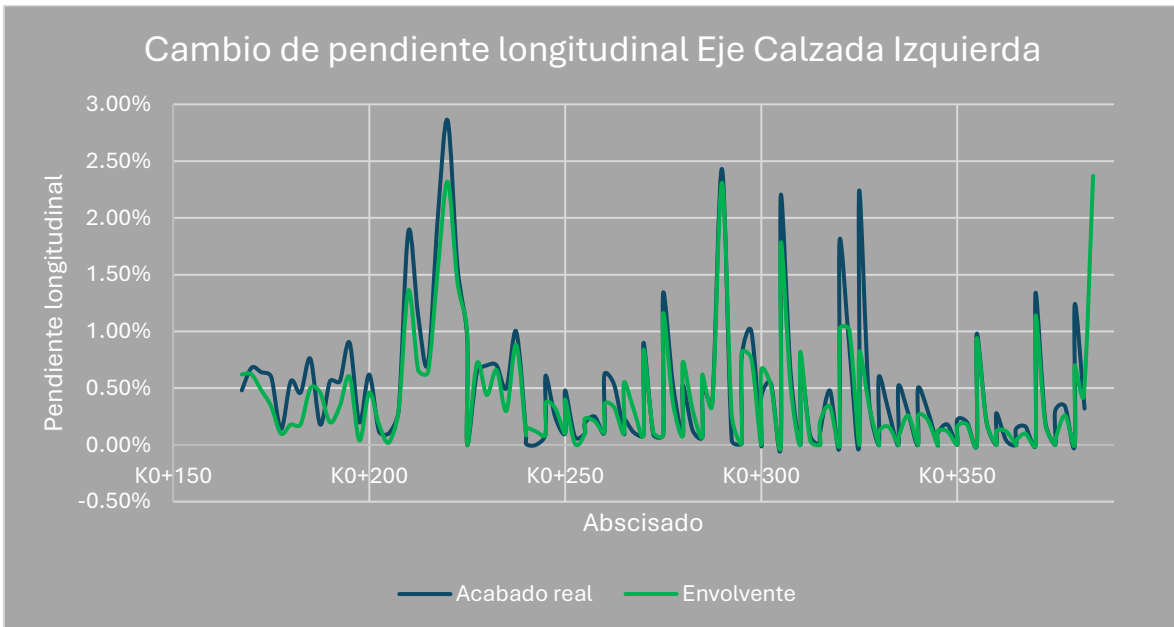


Fig. 22. Cambio de pendiente longitudinal eje calzada izquierda caso de estudio 2.

Con respecto a la calzada derecha, se presenta una disminución en el cambio de pendiente (Δm) máximo, pasando de 3.96% a 3.30%, de igual manera, hay reducción tanto en el promedio del cambio de pendientes, así como en la desviación estándar del mismo. Ver *Tabla 7*.

Máximo Δm real	3.96%	Máximo Δm envolvente:	3.30%
Mínimo Δm real	0.00%	Mínimo Δm envolvente:	0.00%
Δm real promedio:	0.46%	Δm envolvente promedio:	0.40%
Δm real Desviación promedio:	0.57%	Δm envolvente Desviación promedio:	0.50%

Tabla 7. Comparación cambio de pendientes acabado real vs envolvente calzada derecha.

Para el caso de la calzada izquierda también se obtuvieron resultados favorables en cuanto a la suavización de la superficie, logrando pasar de un cambio de pendiente (Δm) máximo de 2.86% a un 2.37% y de igual manera, se reduce el promedio de cambio de pendiente y la desviación de este. Ver *Tabla 8*.

Máximo Δm real:	2.86%	Máximo Δm envolvente:	2.37%
Mínimo Δm real:	0.00%	Mínimo Δm envolvente:	0.00%
Δm real promedio:	0.47%	Δm envolvente promedio:	0.40%
Δm real Desviación promedio:	0.57%	Δm envolvente Desviación promedio:	0.48%

Tabla 8. Comparación cambio de pendientes acabado real vs envolvente calzada izquierda.

Como comparativo adicional, se evaluará la superficie de acabado final real de pavimento que se tuvo en dicha superestructura y se enfrentará a la envolvente expuesta con el fin de identificar si pudo haber una mejoría con respecto a la solución tomada en campo. Para esto, se presentan la *Fig. 23* y *Fig. 24*.

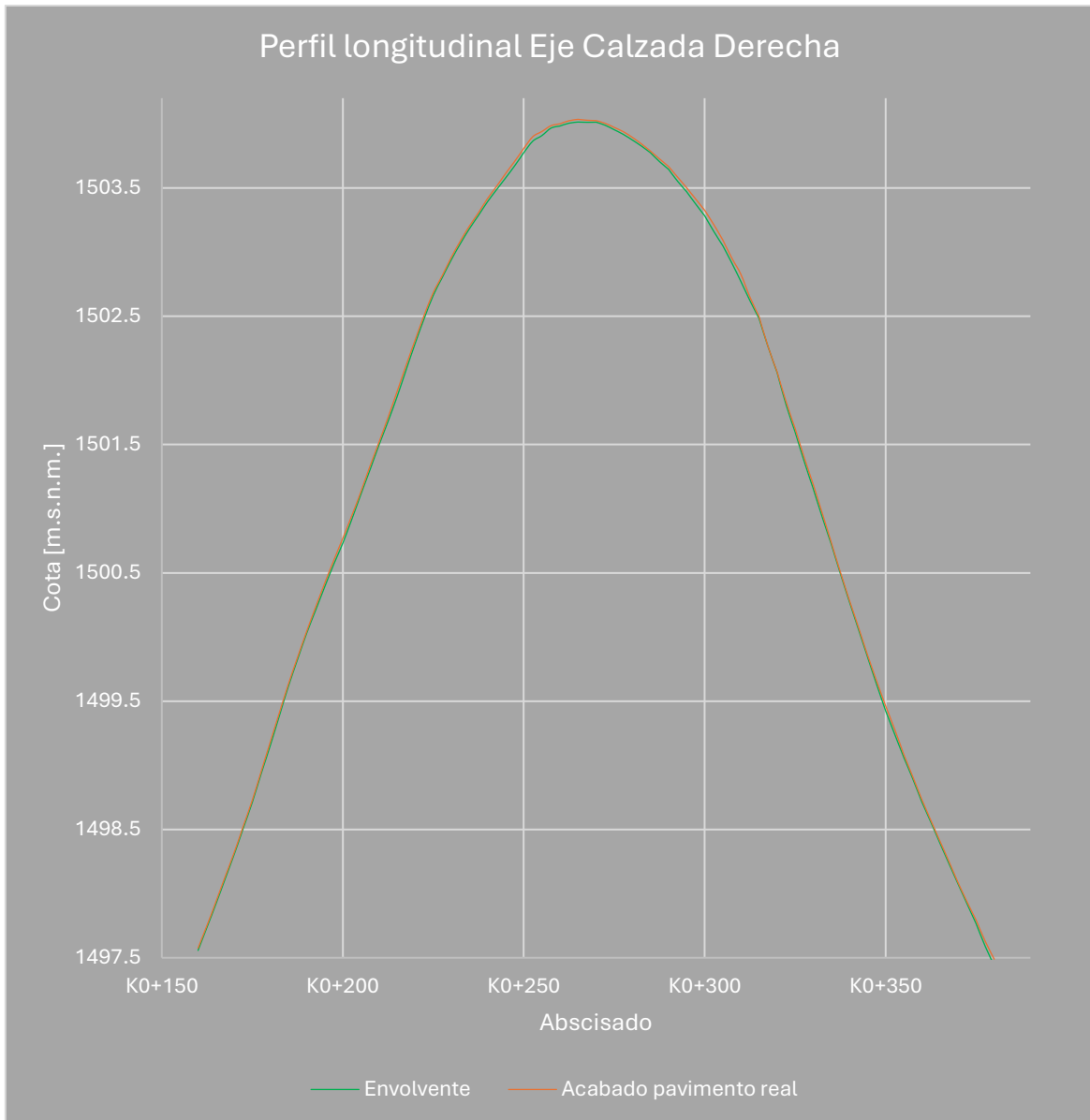


Fig. 23. Perfil longitudinal comparativo acabado real pavimento vs envolvente calzada derecha caso de estudio 2.

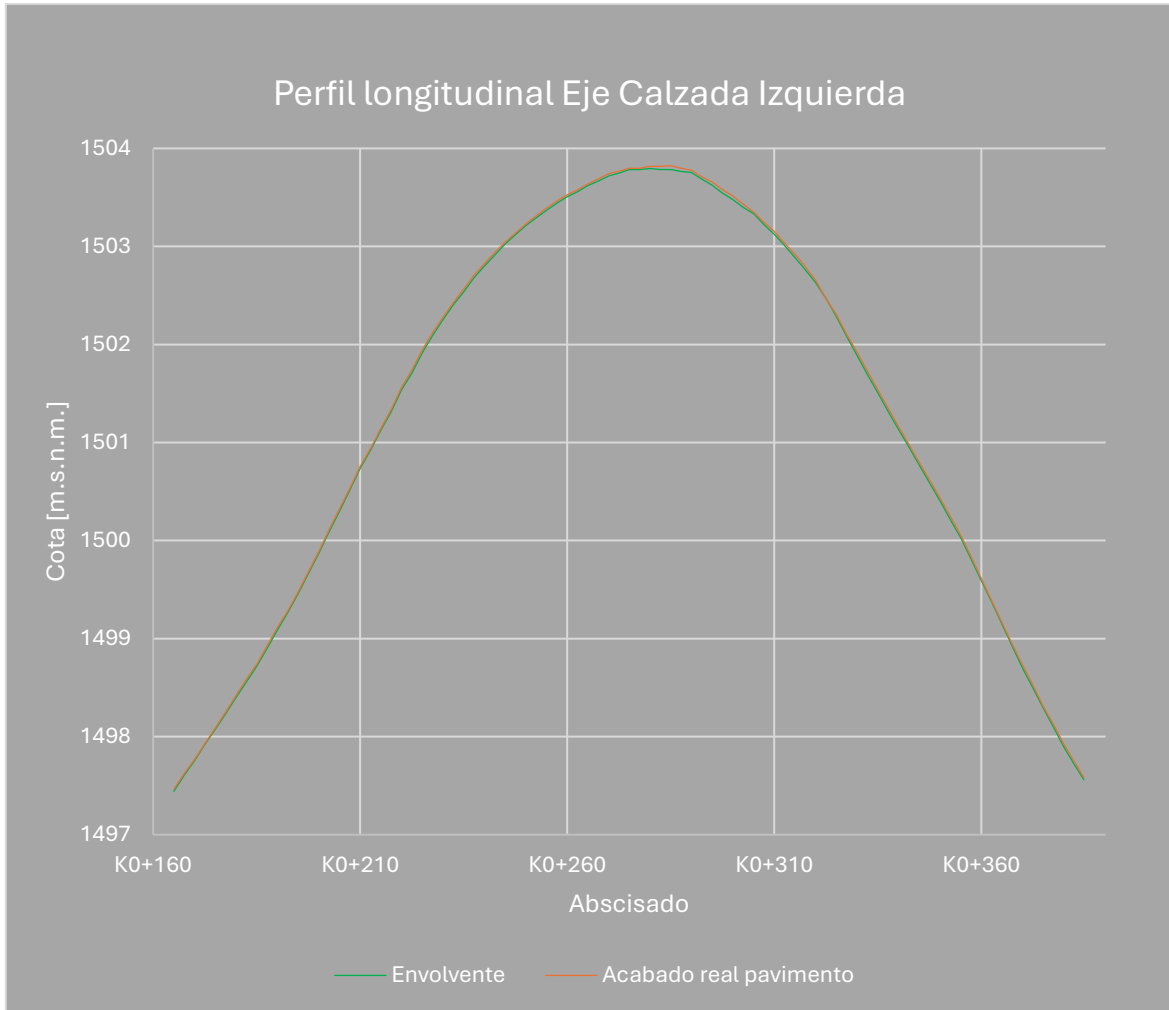


Fig. 24. Perfil longitudinal comparativo acabado real pavimento vs envolvente calzada izquierda caso de estudio 2.

Ahora, de manera numérica en la *Tabla 9* y *Tabla 10* se comparan los resultados del acabado de pavimento real obtenido y la envolvente propuesta para la calzada derecha.

Máximo espesor:	10.60	cm
Mínimo espesor:	6.60	cm
Espesor promedio:	7.84	cm
Desviación promedio:	0.93	cm

Tabla 9. Espesores carpeta de rodadura acabado real calzada derecha caso de estudio 2.

Máximo espesor:	6.80	cm
Mínimo espesor:	5.00	cm
Espesor promedio:	5.71	cm
Desviación promedio:	0.45	cm

Tabla 10. Espesores carpeta de rodadura envolvente propuesta calzada derecha caso de estudio 2.

De esta manera, para la calzada derecha, en caso de haberse implementado la envolvente propuesta, se hubiera pasado de un espesor máximo de 10.60 cm a uno de 6.80 cm, de igual manera, se hubiera obtenido una reducción de 2.13 cm en el espesor promedio de carpeta, lo cual se traduce en menos exceso de pavimento.

Continuando con el mismo ejercicio, se presentan los valores comparativos para la calzada izquierda, de los valores de pavimento real alcanzado y la propuesta de envolvente. Ver *Tabla 11* y *Tabla 12*.

Máximo espesor:	9.90	cm
Mínimo espesor:	6.40	cm
Espesor promedio:	7.82	cm
Desviación promedio:	0.82	cm

Tabla 11. Espesores carpeta de rodadura acabado real calzada izquierda caso de estudio 2.

Máximo espesor:	7.10	cm
Mínimo espesor:	4.50	cm
Espesor promedio:	5.47	cm
Desviación promedio:	0.44	cm

Tabla 12. Espesores carpeta de rodadura envolvente propuesta calzada izquierda caso de estudio 2.

Al igual que con la calzada derecha, también se presentan disminuciones en el espesor máximo y mínimo, así como en el espesor promedio de carpeta, con 2.35 cm de reducción.

Finalmente, en la *Tabla 13* y *Tabla 14*, se presenta el comparativo de optimización entre superficie de acabado real de pavimento y las propuestas de envolvente para ambas calzadas logrando una disminución promedio de un 29% de la carpeta asfáltica, viéndose esto reflejado en una reducción de la carga muerta, así como en la optimización económica de la actividad de instalación de pavimento.

Reducción máximo espesor:	36%
Reducción en el espesor promedio:	27%
Reducción en la variación promedio:	52%
Reducción en volumen de capa de rodadura:	26.26 m3
Reducción en peso de capa de rodadura:	57.77 tn
Disminución carga muerta:	28.83%

Tabla 13. Comparativo envolvente vs acabado real pavimento calzada derecha caso de estudio 2.

Reducción máximo espesor:	28%
Reducción en el espesor promedio:	30%
Reducción en la variación promedio:	47%
Reducción en volumen de capa de rodadura:	27.55 m3
Reducción en peso de capa de rodadura:	60.61 tn
Disminución carga muerta:	29.0%

Tabla 14. Comparativo envolvente vs acabado real pavimento calzada izquierda caso de estudio 2.

8.3 CASO DE ESTUDIO 3

El tercer caso de estudio escogido consiste en un puente en concreto postensado de tipología viga y losa, comprendido por dos luces de 22.75 m. El ancho del tablero es de 10 m, contemplando andenes en ambos costados. En la Fig. 25 se ilustra la planta del puente.

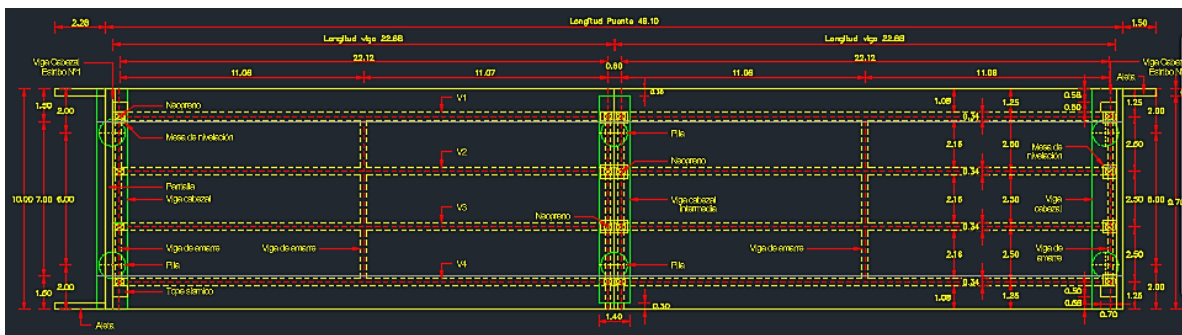


Fig. 25. Planta puente en vigas postensadas y losa caso de estudio 3.

El puente en cuestión posee una pendiente longitudinal pronunciada del 15.2% y una transición de peraltes a lo largo del trazado, como se puede apreciar en la Fig. 26.

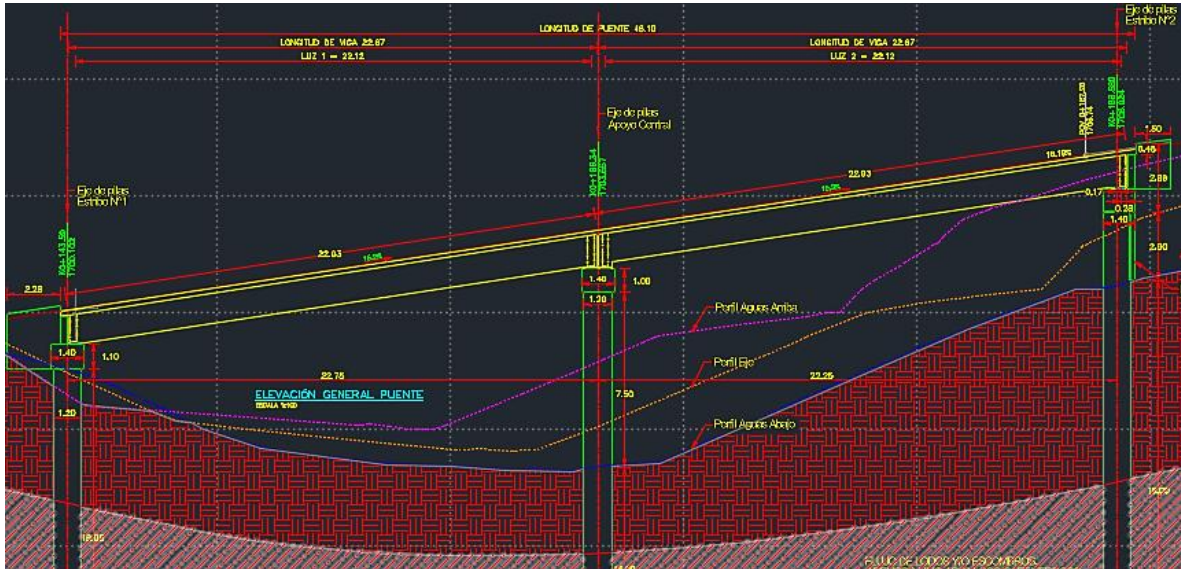


Fig. 26. Perfil en alzada puente caso de estudio 3.

Con respecto a la sección transversal, el tablero en concreto se encuentra soportado sobre cuatro vigas postensadas en cada luz y la sección de losa es constante. Ver Fig. 27.

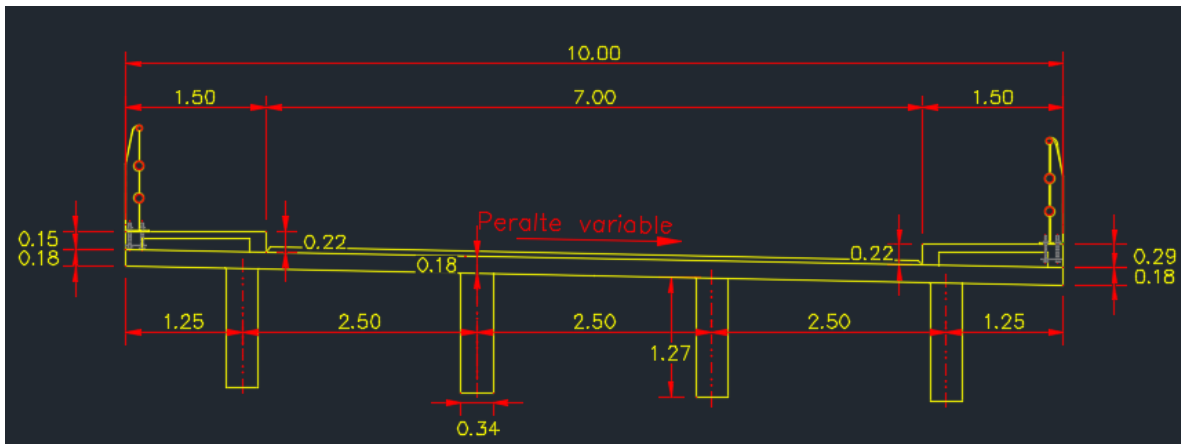


Fig. 27. Sección transversal típica caso de estudio 3.

En cuanto a la metodología constructiva, al darse las condiciones topográficas para la construcción de una obra falsa en andamios, se armaron torres de carga elevadas a la altura de diseño de cada viga, de manera que cada una de ellas fue fundida y tensionada en sitio. Para el tablero, se implementaron aleros de carga y cerchas adosadas a las vigas, para hacer de plataforma de soporte para el encofrado de la losa. Ver Fig. 28.



Fig. 28. Obra falsa para caso de estudio 3.

Para este caso de estudio, a continuación, en la Fig. 29, se presenta el perfil longitudinal a lo largo del eje, comparando la superficie de acabado real alcanzada y el nivel teórico por diseño.

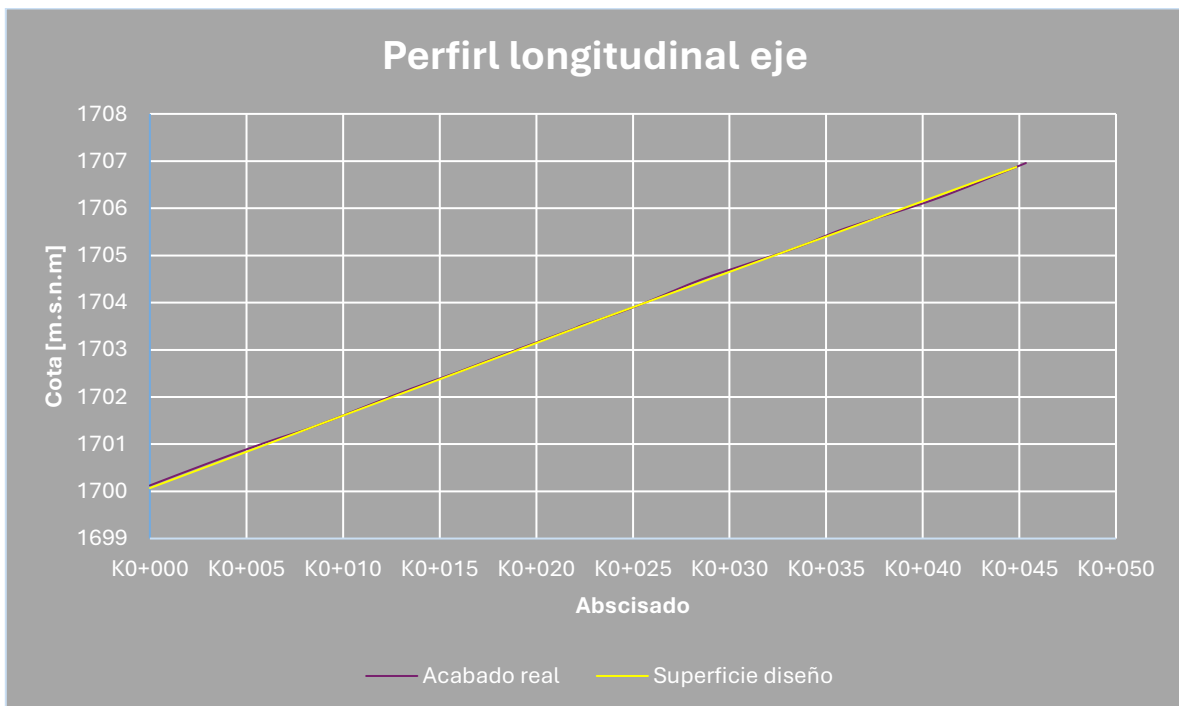


Fig. 29. Perfil longitudinal eje acabado real vs diseño caso de estudio 3.

De manera numérica, en la *Tabla 15*, se presenta el resumen de las irregularidades en el acabado del tablero.

Máxima cresta:	6.21	cm
Máxima depresión:	5.19	cm
Irregularidad promedio:	1.73	cm
Desviación promedio:	2.74	cm

Tabla 15. Desviaciones constructivas caso de estudio 3.

Es de anotar, que las desviaciones anteriores, aunque no tengan valores muy elevados, impiden llegar ya a la cota de acabado de diseño original al tener valores de cresta por encima de este, por lo que la solución pragmática al igual que se explica en el caso de estudio 1, es la superposición del diseño a la máxima desviación por encima en el acabado real. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, esta práctica si no es analizada para cada caso en particular, puede conllevar a grandes sobre espesores de carpeta asfáltica. Por esto, es que se propone nuevamente, un nuevo perfil envolvente que se adapte a los niveles alcanzados en campo.

En la *Fig. 30* se muestra el perfil longitudinal a lo largo del eje de la metodología de las líneas guías para la elaboración de la envolvente.

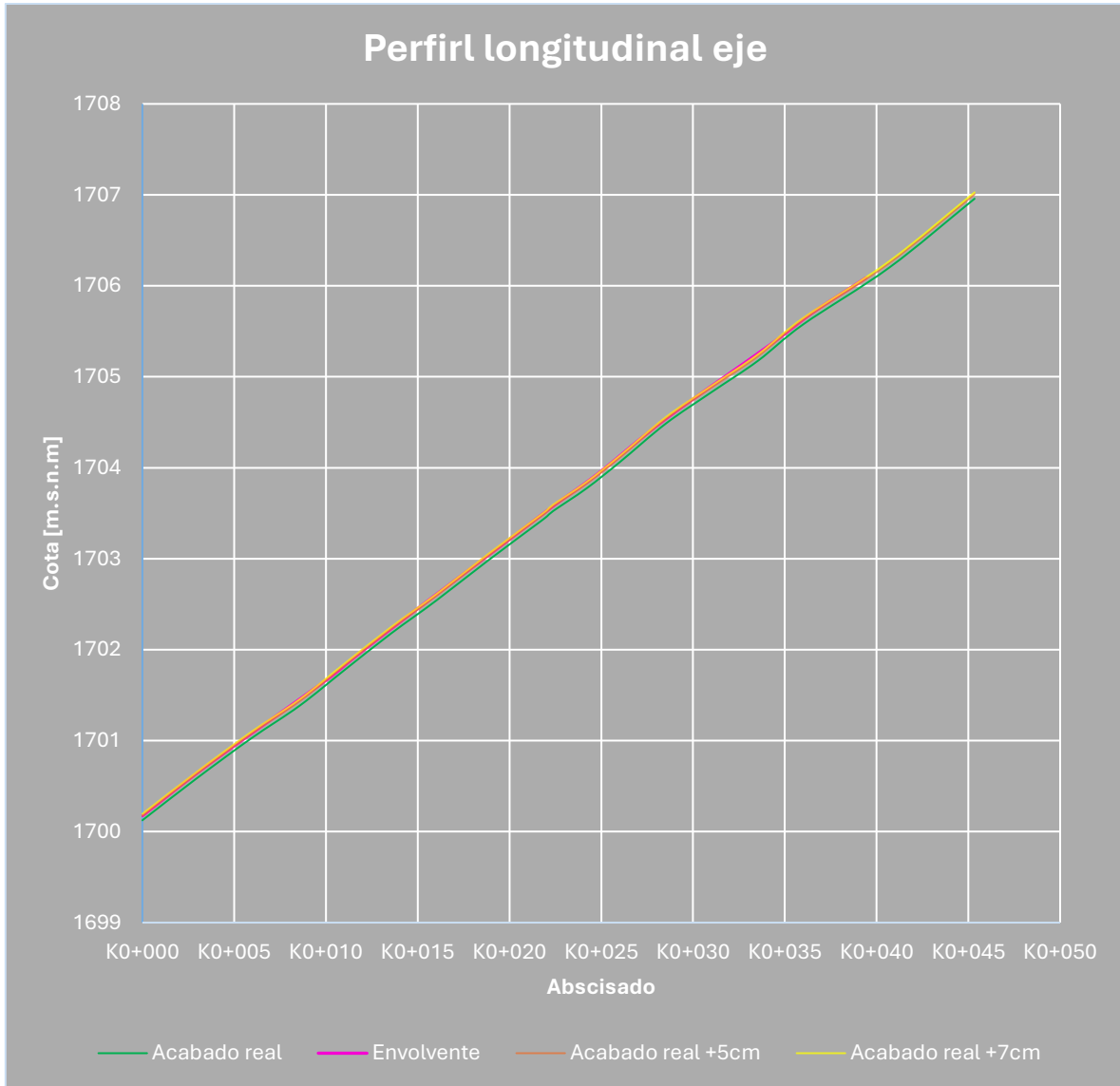


Fig. 30. Perfil longitudinal eje para envolvente caso de estudio 3.

Para aterrizar mejor las bondades del ejercicio, en la Fig. 31, se presenta la suavización del trazado en el cambio de pendiente longitudinal a lo largo del eje del tablero.

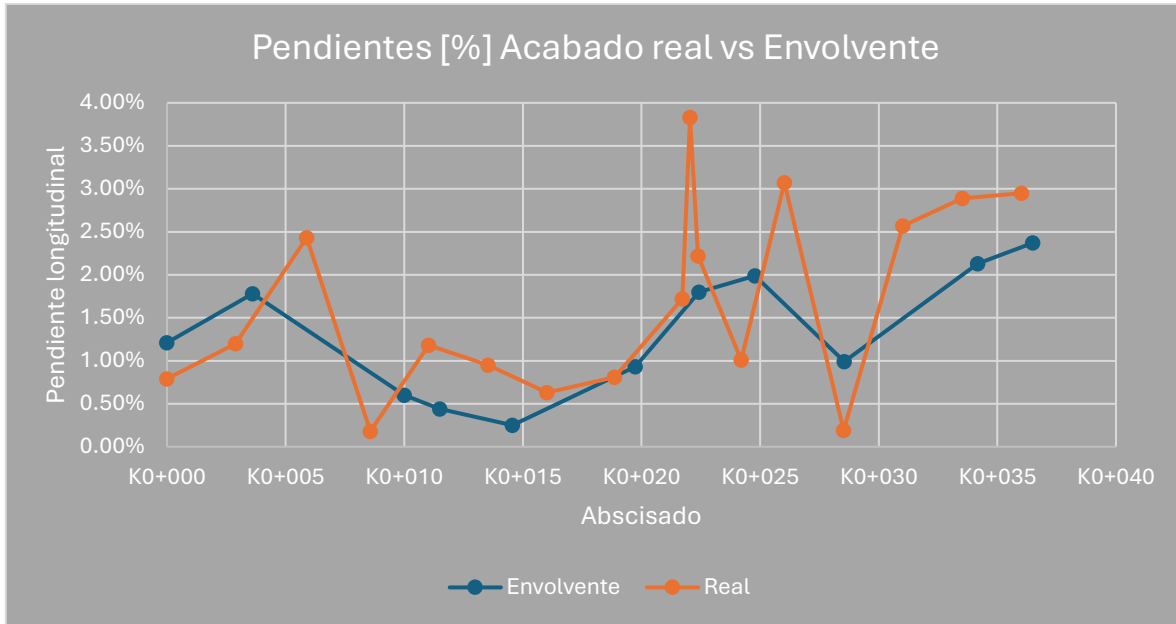


Fig. 31. Comparativo cambio de pendiente longitudinal envolverte vs acabado real caso de estudio 3.

Como se evidencia, se logran reducciones en los valores de cambio de pendiente longitudinal (Δm), asociándose esto con mayor suavidad y confort para el usuario. Por ejemplo, se pasa de un delta máximo de pendiente de 3.83% a un 2.37%. También se disminuye el cambio promedio de pendiente y la desviación de este. Ver *Tabla 16*.

Máximo Δm real	3.83%	Máximo Δm envolverte	2.37%
Mínimo Δm real	0.18%	Mínimo Δm envolverte	0.25%
Δm real promedio:	1.68%	Δm envolverte promedio:	1.32%
Δm real Desviación promedio:	1.11%	Δm envolverte Desviación promedio:	0.73%

Tabla 16. Comparación superficie eje acabado real vs envolverte caso de estudio 3.

A manera de contraste con el ejercicio de la envolverte, se presenta el método pragmático del diseño superpuesto a la mayor cresta de acabado. Para esto, se realizó el diseño los 6.21 cm de cresta máxima y se contemplan los 5 cm de pavimento por diseño. El resultado se presenta en la *Fig. 32*.

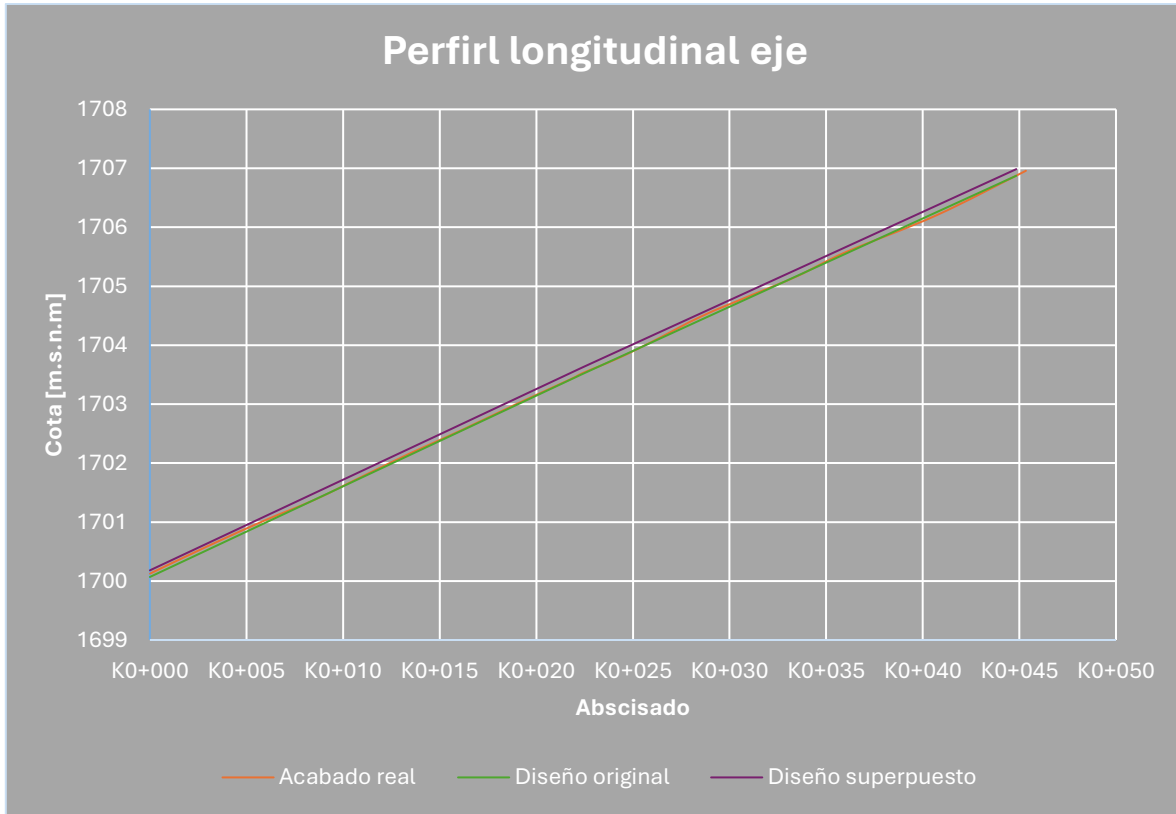


Fig. 32. Perfil longitudinal comparativo diseño superpuesto a máxima desviación caso de estudio 3.

Esta superposición, como era de esperar, genera sobre espesores que podrían evitarse mediante la optimización de la envolvente. Por ejemplo, se alcanza un espesor máximo de 16.40 cm y un promedio de 9.48 cm, valores muy desfasados al espesor propuesto por diseño (5.00 cm), pudiendo llegar a ser una carga muerta nociva para la estructura si no se tuvo un margen en el factor de seguridad para esta carga en el diseño. En la *Tabla 17* se presenta el resumen de los datos obtenidos por la superposición del diseño.

Máxima espesor:	16.40	cm
Mínimo espesor:	5.00	cm
Espesor promedio:	9.48	cm
Desviación promedio:	2.74	cm
Volumen de pavimento	20.50	m3

Tabla 17. Espesores carpeta de rodadura rasante de diseño superpuesta caso de estudio 3.

En oposición a la información anterior, en la *Tabla 18*, se presentan los espesores obtenidos por la metodología del nuevo perfil envolvente.

Máxima espesor:	8.40	cm
Mínimo espesor:	4.90	cm
Espesor promedio:	5.96	cm
Desviación promedio:	0.86	cm
Volumen de pavimento:	15.71	m3

Tabla 18. Espesores carpeta de rodadura envolvente caso de estudio 3.

De acuerdo con la tabla anterior se logra una optimización tanto para el valor máximo de espesor de carpeta, pasando de 16.40 cm a 8.40 cm, así como del espesor promedio, disminuyéndolo en 3.52 cm.

Para terminar de enfatizar las virtudes del ejercicio, en la *Tabla 19*, se presenta el resumen de las mejorías alcanzadas con respecto a la metodología pragmática de superposición.

Reducción máximo espesor:	49%
Reducción en el espesor promedio:	37%
Reducción en la variación promedio:	69%
Reducción en volumen de capa de rodadura:	4.79 m3
Reducción en peso de capa de rodadura:	10.54 tn
Disminución carga muerta:	23%

Tabla 19. Comparativo envolvente vs superposición rasante diseño caso de estudio 3.

8.4 CASO DE ESTUDIO 4

El cuarto y último caso de estudio propuesto corresponde a un puente en voladizos sucesivos mixto con tramos autosoportados y otros en contrapeso. El trazado consta de 240.25m, de los cuales los primeros 30 m corresponden al contrapeso inicial, la luz 1 consta de 139.5m y la luz final con 70.75m. Ver *Fig. 33*.

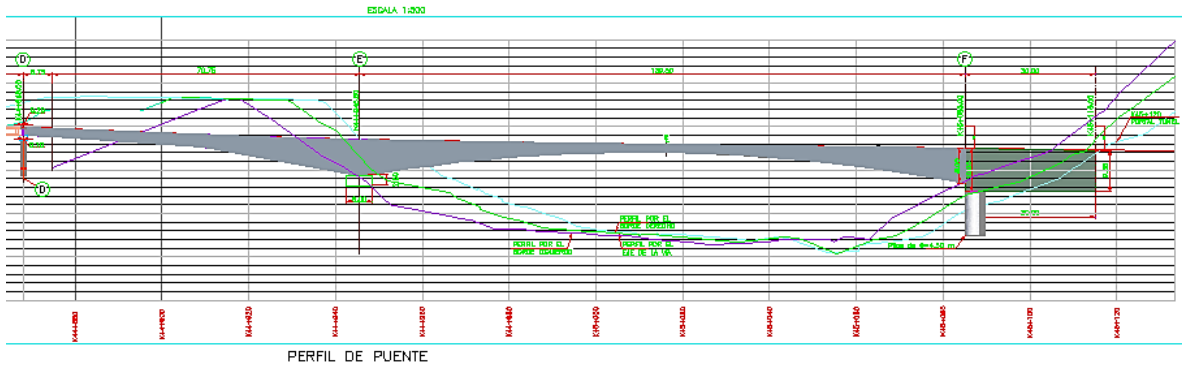


Fig. 33. Vista alzada en perfil puente caso de estudio 4.

A diferencia del caso de estudio 1, este puente cuenta tanto con una curva horizontal como con una ligera curva vertical a lo largo del trazado, haciendo de esto un nuevo escenario de análisis.

La sección transversal del tablero es variable debido a un sobreesfuerzo presentado al inicio del trazado. Ver Fig. 34 y Fig. 35.

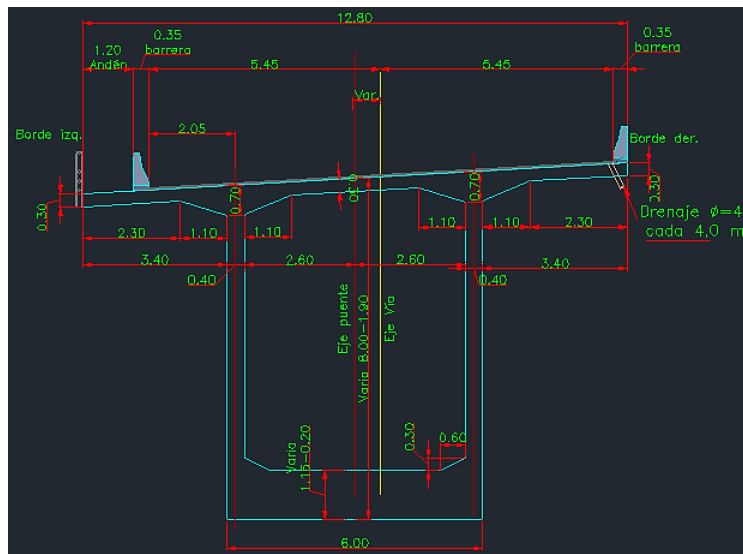


Fig. 34. Sección transversal típica caso de estudio 4.

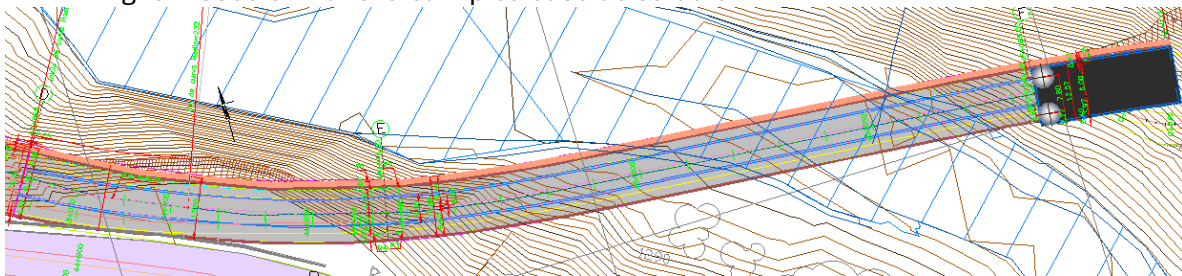


Fig. 35. Vista en planta puente caso de estudio 4.

El método constructivo fue a través de carros de avance al igual que en el caso de estudio 1. Este tipo de sistema requiere de un mayor control topográfico como se ha mencionado en la justificación y es más propenso a la desviación de nivel acumulada, ya que cada tramo fundido depende del anterior al ser voladizos. Acentuando la dificultad anterior, el puente en cuestión, se debió ver suspendido tres meses a lo largo de su ejecución por la falta de culminación del portal del túnel al cual llegaba el contrapeso.

A continuación, en la *Fig. 36*, se presenta la comparación entre el nivel de diseño y el acabado real alcanzado para el concreto del tablero.

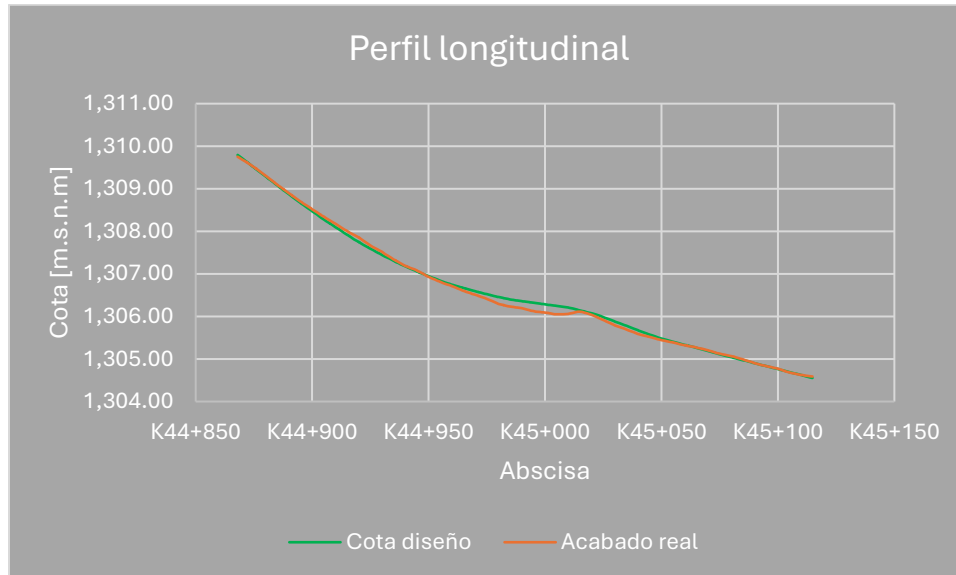


Fig. 36. Perfil longitudinal eje a nivel de concreto caso de estudio 4.

Como se identifica en la figura anterior se presentan desviaciones significativas en el nivel de acabado de concreto a lo largo del trazado. Con el fin de poderlas analizar de una manera numérica, en la *Tabla 20*, se presentan dichas irregularidades a lo largo del eje.

Máxima cresta:	20.00	cm
Máxima depresión:	10.80	cm
Irregularidad promedio:	5.57	cm
Desviación promedio:	5.48	cm

Tabla 20. Irregularidades tablero caso de estudio 4.

De esta tabla se destaca que se presentó una cresta o protuberancia máxima de 20 cm, así como una depresión de 10.80 cm y una fluctuación promedio de diferencia de cotas entre acabado real y diseño de 5.48 cm. Con base a lo anterior, se identifica la importancia de realizar nuevamente el ejercicio de encontrar una superficie envolvente que se adapte a las

circunstancias alcanzadas, pero que mejore la regularidad en el alineamiento vertical y que evite grandes sobre espesores. Para esto se implementa la metodología ya conocida de líneas de referencia para el trazado del nuevo perfil. El resultado obtenido se presenta en la Fig. 37.

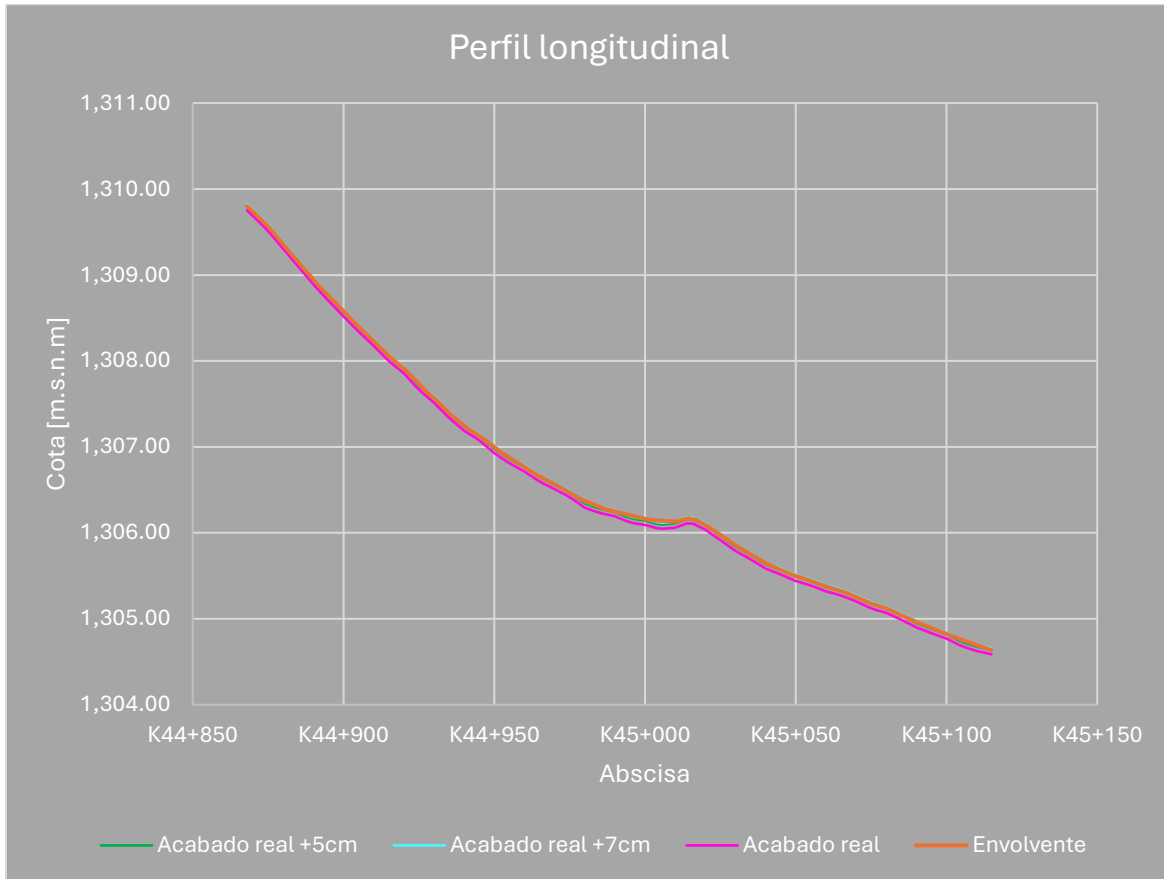


Fig. 37. Perfil longitudinal envolvente caso de estudio 4.

Al igual que en los otros casos de estudio, para ilustrar de una manera más explícita las bondades del ejercicio de la envolvente, en la se presenta el cambio de pendiente longitudinal a lo largo del eje tanto para el acabado real como para el nuevo perfil propuesto.

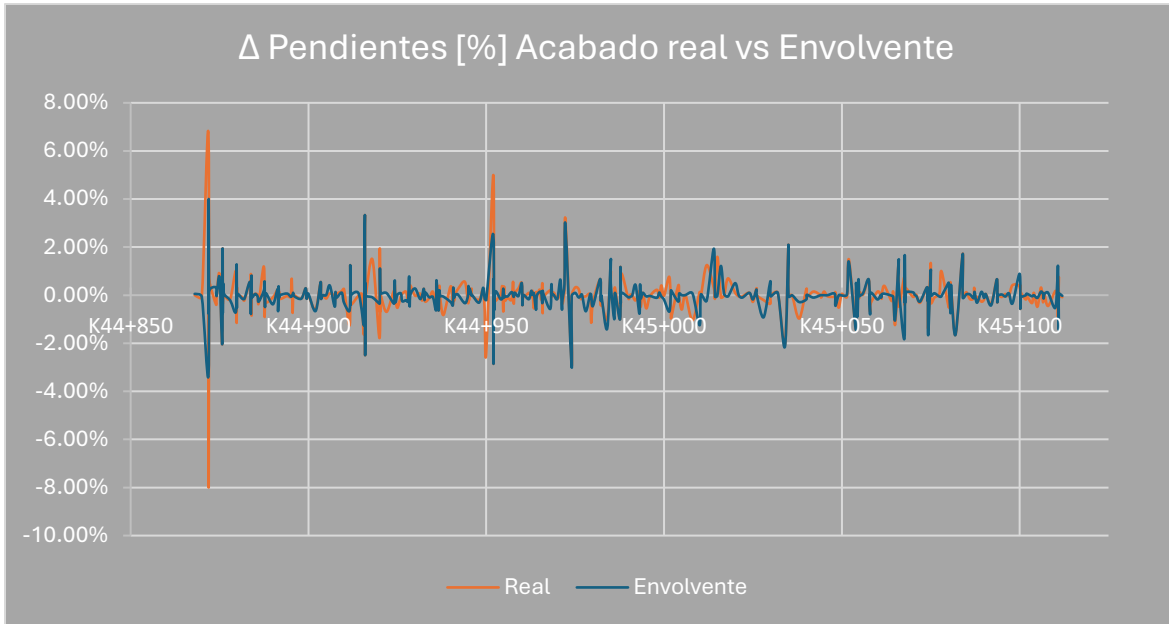


Fig. 38. Cambio de pendiente longitudinal a lo largo del eje caso de estudio.

Como se logra apreciar en el gráfico anterior, se alcanza una reducción en los grandes picos del cambio de pendiente longitudinal con la envolvente, así como un comportamiento más homogéneo, lo cual se traduce en mayor confort en la transitabilidad. En la *Tabla 21* se exponen los valores comparativos de los cambios de pendiente (Δm) entre el acabado real y la envolvente propuesta.

Máximo Δm real	8.00%	Máximo Δm envolvente	4.00%
Mínimo Δm real	0.00%	Mínimo Δm envolvente	0.00%
Δm real promedio:	0.45%	Δm envolvente promedio:	0.39%
Δm real Desviación promedio:	0.80%	Δm envolvente Desviación promedio:	0.60%

Tabla 21. Comparativo superficie eje acabado real vs envolvente caso de estudio 4.

De esta manera, de acuerdo con la tabla anterior, se logra una reducción del 100% en el cambio de pendiente máximo a lo largo del eje, así como la disminución en el promedio de las irregularidades y su desviación en alrededor de un 25% con la envolvente propuesta.

Con el objetivo de destacar aún más las ventajas de la envolvente, a continuación, en la *Fig. 39*, se presenta el acabado real del pavimento que se construyó en dicho puente el cual también intentó una disminución de las irregularidades, pero sin un método claro y ejecutado de manera empírica. De manera comparativa, se dibuja también el ejercicio de envolvente.

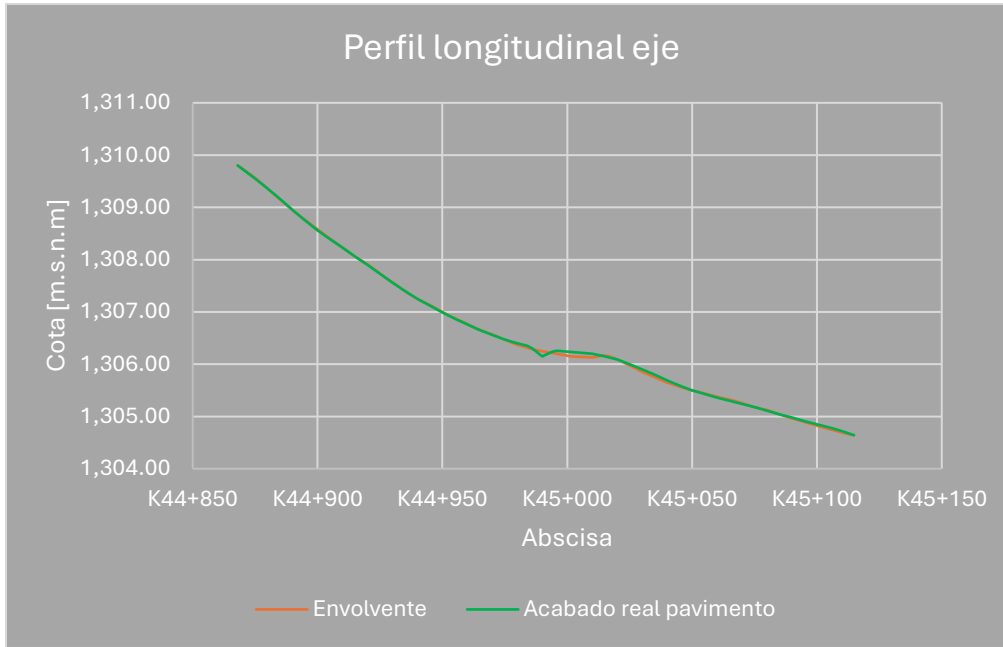


Fig. 39. Perfil longitudinal comparativo entre el acabado real de pavimento y la envolvente propuesta caso de estudio 4.

Como se aprecia en el gráfico anterior, el acabado real del pavimento, pese a su intento por disminuir las irregularidades igual conserva una gran depresión en la curva vertical, genera zonas con grandes sobre espesores y sitios con recubrimiento insuficiente de carpeta. Ver *Tabla 22*.

Máximo espesor:	17.00	cm
Mínimo espesor:	0.50	cm
Espesor promedio:	6.33	cm
Desviación promedio	2.93	cm

Tabla 22. Espesores de carpeta de rodadura acabado real pavimento caso de estudio 4.

Verificando los datos de la tabla anterior se evidencia un espesor máximo de carpeta de 17.0 cm y un espesor mínimo de 0.5 cm. Ambos valores no son satisfactorios pues uno genera mayor carga muerta y el otro no garantiza la integridad de la carpeta para una rodadura segura por la misma. Por otro lado, en la *Tabla 23*, se presentan los valores de espesor de pavimento para la envolvente propuesta para este caso de estudio.

Máximo espesor:	9.10	cm
Mínimo espesor:	5.00	cm
Espesor promedio:	5.95	cm
Desviación promedio	0.72	cm

Tabla 23. Espesores de carpeta de rodadura propuesta envolvente caso de estudio 4.

De esta manera, según la tabla anterior, la envolvente propuesta logra tener un espesor máximo de 9.1 cm y uno mínimo de 5.0 cm. Ambos valores son coherentes y tolerables, pues no hay un sobre espesor tan marcado y se garantiza siempre el espesor mínimo de carpeta. Así mismo, se logra una disminución en el espesor promedio y en la desviación de este. Información que se ilustra mejor en la *Tabla 24*.

Reducción máximo espesor:	87%
Reducción en el espesor promedio:	6%
Reducción en la variación promedio:	308%
Reducción en volumen de capa de rodadura:	27.66 m ³
Reducción en peso de capa de rodadura:	60.85 tn
Disminución carga muerta:	16%

Tabla 24. Comparativo envolvente vs pavimento real caso de estudio 4.

Finalmente, de la información anterior, se destaca la reducción en el espesor máximo de un 87%, la disminución de la variabilidad del espesor de un 308%, lo que hace notoriamente más fácil la colocación de la mezcla asfáltica y una optimización del 16% en la carga muerta por el peso de la carpeta. Para el peso unitario de la carpeta asfáltica, como en los otros casos de estudio, se asume un valor de 2.20 tn/m³.

9. CONCLUSIONES

Una vez ilustrados los cuatro casos de estudio, para puentes en diferentes tipologías estructurales, así como construidos con metodologías de obra falsa distintas, logra destacarse las ventajas de realizar un nuevo rediseño para la carpeta de rodadura, basados en el acabado real, de manera que se reduzcan las irregularidades alcanzadas en la superficie del concreto, así como que se minimice la generación de sobre espesores de carpeta, que puedan conllevar a una sobrecarga por peso muerto y mayores sobrecostos para el proyecto. En la Tabla 25 se compila el resumen de los resultados obtenidos para los casos de estudio.

RESUMEN DE RESULTADOS	Caso de estudio 1 (Vs Superposición)	Caso de estudio 2 (Vs acabado real)		Caso de estudio 3 (Vs superposición)	Caso de estudio 4 (Vs acabado real)
		Calzada izquierda	Calzada derecha		
Tipología de puente:	Voladizos sucesivos	Viga cajón		Vigas postensadas	Voladizos sucesivos
Condiciones críticas:	Curva horizontal Contrapeso	Curva vertical pronunciada y curva horizontal		Alta pendiente longitudinal	Curva vertical Curva horizontal Contrapeso
Reducción máximo espesor:	71%	28%	36%	49%	87%
Reducción en el espesor promedio:	68%	30%	27%	37%	6%
Reducción en la variación promedio:	79%	47%	52%	69%	308%
Reducción en volumen de capa de rodadura:	249.84 m ³	27.55 m ³	26.26 m ³	4.79 m ³	27.66 m ³
Reducción en la desviación del cambio de pendiente longitudinal:	28.1%	15.8%	12.3%	34.2%	25.0%
Reducción en peso de capa de rodadura:	549.65 tn	60.61 tn	57.77 tn	10.54 tn	60.85 tn
Disminución carga muerta:	244.20%	29.00%	28.83%	23%	16%

Tabla 25. Resumen de resultados casos de estudio.

De dichos resultados se destaca una reducción de hasta el 244% de la carga muerta, comparada con la metodología pragmática de la superposición del diseño y un decrecimiento del 68% del espesor promedio de carpeta (Ver caso de estudio 1). También es de resaltar una disminución de la desviación del cambio en la pendiente longitudinal de hasta un 34.2% (Ver caso de estudio 3). Finalmente, desde el aspecto de facilidad constructiva, se hace relevante la reducción de un 308% en la variación del espesor del pavimento, logrando una instalación más práctica de la carpeta asfáltica (Ver caso de estudio 4).

De esta manera, se puede llegar a la conclusión general, que es mejor adaptarse a los resultados obtenidos en el acabado de la superestructura durante la etapa constructiva y no forzarlos a un diseño inicial, que quizás, ya no sea la solución óptima para las condiciones finales, haciéndose fundamental la implementación de envolventes o nuevas superficies de rodadura, identificadas mediante la ayuda de programas tipo CAD así como se realizó para los casos de estudio. Logrando así un mejor acabado, mayor confort en la transitabilidad, menor carga muerta y disminución de sobre costos por el incremento de espesores de carpeta de rodadura.

10. RECOMENDACIONES

Para finalizar, se plantean algunas recomendaciones con base en la revisión documental y el análisis de los datos obtenidos mediante los casos de estudio.

- Desde la fase de diseño, es importante considerar un factor de seguridad para la carga muerta del tablero. De esta manera se puede tener un rango de maniobra para solucionar posibles desviaciones constructivas en el acabado del mismo mediante la capa de rodadura. Un factor de seguridad adecuado puede evitar problemas más adelante en la ejecución del proyecto.
- Es evidente que la causa raíz de la problemática de las irregularidades del tablero surgen en la fase constructiva; es por esto que se debe contar con un buen control topográfico a lo largo de la ejecución del puente y tener especial cuidado con la superestructura. Un seguimiento constante de las deflexiones a lo largo del trazado ayuda a mitigar las irregularidades y a predecir el comportamiento de los próximos tramos a fundir.
- Los puentes con grandes luces, y especialmente los construidos mediante voladizos sucesivos, son los más propensos a resultar con desviaciones constructivas. Esto se debe a la ejecución segmentada y la dependencia entre dovelas, así como los reiterativos procesos de tensionamiento para la unión de las mismas. Es por esto que es altamente recomendable un acompañamiento constante por parte del diseñador, que conozca el sistema de carros de avance del constructor, las deformaciones obtenidas y se comparen con las de diseño, de manera que se puedan ir solventando posibles desviaciones a lo largo del proceso constructivo.
- El sistema de encofrado también debe ser elegido de acuerdo con las solicitudes de carga que tendrá a la hora de fundir el concreto. Una deformación por sobrecarga puede generar acabados irregulares y poco estéticos, además, en el peor de los casos, puede conllevar a la pérdida del concreto por la ruptura de este y posibles accidentes.
- Conocer las rigideces y modelar el comportamiento del sistema de obra falsa permite disminuir las deflexiones indeseadas, mediante la estimación de contra flechas previas a la fundida de concreto.
- En caso de que la obra falsa para la superestructura sea sobre terreno también es recomendable verificar la capacidad portante del suelo y su tendencia a la deformación. De esta manera se sabe con antelación si se requiere de un mejoramiento del suelo o pedestales para distribuir mejor la carga con el fin de evitar asentamientos perjudiciales para la estructura.
- De ser posible, se debe evitar la transición de curvas horizontales a lo largo del desarrollo del puente, grandes cambios de peralte pueden conllevar a irregularidades en el acabado por la rigidez de algunos sistemas de obra falsa utilizados en el medio que no facilitan este tipo de transiciones.

REFERENCIAS

- [1] S. Talebi *et al.*, “Causes of Defects Associated with Tolerances in Construction: A Case Study”, *J. Manage. Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 1-12, jul., 2021, [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000914>
- [2] L. Wan, J. Qiao, Q. Sun, and J. Liu, “Construction control of rigid frame-continuous girder bridge based on grey theory”, *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 71, no. 1, pp. 1-10, dec. 2024, [Online]. Available: <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-024-00507-6>
- [3] A. Z. Sampaio and O. P. Martins, “The application of virtual reality technology in the construction of bridge: The cantilever and incremental launching methods”, *Autom. Constr.*, vol. 37, pp. 58–67, 2014, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580513001830>
- [4] Q. Du, Y. Zhang, and C. Song, “Construction monitoring techniques for JU-ma River NO.3 Bridge”, *Adv. Mater. Res.*, vols. 446-449, pp. 274–277, jan., 2012, [Online]. Available: <https://www.scientific.net/AMR.446-449.274>
- [5] T. Guo, M. Asce, and Z. Chen, “Deflection Control of Long-Span PSC Box-Girder Bridge Based on Field Monitoring and Probabilistic FEA”, *J. Perf. Constr. Fac.*, vol. 30, no. 6, pp. 1-10, may, 2016. [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000909>
- [6] L. Zou and J. Cheng, “Study on Influence of Suspension Interval Length on Construction and Closure of Main Girder of Continuous Rigid Frame Bridge”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, jul., 2019, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334694137_Study_on_Influence_of_Suspension_Interval_Length_on_Construction_and_Closure_of_Main_Girder_of_Continuous_Rigid_Frame_Bridge
- [7] X. Wang and C. Wang, “Analysis of temperature stress in control of bridge construction”, *Int. J. Heat Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 715–721, 2016, [Online]. Available: <https://www.iieta.org/journals/ijht/paper/10.18280/ijht.340423>
- [8] P. Mondorf *et al.*, “Segmental cantilever bridge construction case study”, *J. Constr. Eng. Mang.*, vol. 123, pp. 79-84, mar., 1997. [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9364%281997%29123%3A1%2879%29>
- [9] G. Xu, W. Xu, Z. Wang, and R. Zhang, “Improved Deflection Prediction Model for PSC Box Girder with Stay Cable System during Tensioning Phase”, *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2024,

- pp. 1-13, jun., 2024, [Online]. Available:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/8878093>
- [10] F. Zhang and Y. Wang, “Key Construction Monitoring Technology for Long-Span Continuous Girder Bridge”, *Convert. Mag.*, vol. 2021, no. 4, pp. 220-231, 2021. [Online]. Available: <http://converter-magazine.info/index.php/converter/article/view/172>
- [11] B. Behkamal, A. Entezami, C. De Michele, and A. N. Arslan, “Investigation of Temperature Effects into Long-Span Bridges via Hybrid Sensing and Supervised Regression Models”, *Remote Sens.*, vol. 15, no. 14, pp. 1-27, jul. 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/14/3503>
- [12] Y. Zeng, Y. Wang, Z. Shi, H. Tan, and A. Gu, “Experimental Study on Stability of Long-Span PC Cable-Stayed Bridge during the Construction Periods”, *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2022, pp 1-10, aug., 2022, [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/8578684>
- [13] X. Yu and D. Chen, “Innovative method for the construction of cable-stayed bridges by cable crane”, *Struct. Eng. Int.*, vol. 28, no. 4, pp. 498–505, aug., 2018, [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10168664.2018.1459223>
- [14] X. Wang, “Optimization Design and Effect analysis of Closure Process of cantilever continuous beam bridge”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 490, no.3, pp.1-6, apr. 2019, [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/490/3/032011>
- [15] X. Zheng and D. Guan, “Study on construction monitoring and control of multi-span prestressed concrete continuous beam bridge”, *Stavební obzor - Civ. Eng. J.*, vol. 33, no. 1, pp. 65–77, Apr. 2024, [Online]. Available: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/cej/article/view/9414>
- [16] Q. Li and J. Xie, “Bridge Alignment Prediction Based on Combination of Grey Model and BP Neural Network”, *Appli.Sci.*, vol. 14, no. 17, pp. 1-13, sep. 2024, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7955>
- [17] J. Zheng, “Recent Construction Technology Innovations and Practices for Large-Span Arch Bridges in China”, *Engineering*, no. 41, pp. 110-129, oct. 2024, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809924003606?via%3Dihub>
- [18] J. Sun, J. Li, Y. Jiang, X. Ma, Z. Tan, and G. Zhufu, “Key Construction Technology and Monitoring of Long-Span Steel Box Tied Arch Bridge”, *Int. J. Steel Struct.*, vol. 23, no. 1, pp. 191–207, feb. 2023, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/365058385_Key_Construction_Technology_and_Monitoring_of_Long-Span_Steel_Box_Tied_Arch_Bridge

- [19] J. Wu, D. M. Frangopol, and M. Soliman, “Geometry control simulation for long-span steel cable-stayed bridges based on geometrically nonlinear analysis”, *Eng. Struct.*, vol. 90, pp. 71–82, may, 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615000814>
- [20] K. Xie, J. Ning, Q. Wang, and H. Yao, “Deformation prediction during the construction of segmental bridges based on GA-SMO-SVM algorithm: an example of CFST arch bridge”, *J. Civ. Struct. Health Monit.*, vol. 15, pp. 31-57, jan., 2024, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-024-00825-6>
- [21] J. Wu, Q. Yan, J. Li, and M. Hu, “Geometry control of long-span continuous girder concrete bridge during construction through finite element model updating”, *Health Monit. Struct. Biol. Syst.*, SPIE, Las Vegas, apr. 2016, [Online]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9805/98052U/Geometry-control-of-long-span-continuous-girder-concrete-bridge-during/10.1117/12.2219477.short>
- [22] X. X. Cheng, “Model Updating for a Continuous Concrete Girder Bridge Using Data from Construction Monitoring”, *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 6, pp. 1-20, mar., 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/6/3422>
- [23] K. M. Lee, Y. B. Lee, C. S. Shim, and K. L. Park, “Bridge information models for construction of a concrete box-girder bridge”, *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 8, no. 7, pp. 687–703, jul. 2012, [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732471003727977>
- [24] Y. Zhu, J. C. Brigham, and A. Fascetti, “LiDAR-RGB Data Fusion for Four-Dimensional UAV-Based Monitoring of Reinforced Concrete Bridge Construction: Case Study of the Fern Hollow Bridge Reconstruction”, *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 151, no. 1, pp. 1-15, jan., 2025, [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JCEMD4.COENG-15411>
- [25] S. Dorafshan and M. Maguire, “Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation”, *J Civ Struct Health Monit*, vol. 8, no. 3, pp. 443–476, jul., 2018, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-018-0285-4>
- [26] Y. Zhang, L. Wang, Y. Nong, and W. Wang, “Construction-Monitoring Analysis of a Symmetrical Rigid Frame Tied Steel Box Arch Bridge in Southwest China Based on Segmental Assembly Technique”, *Symmetry*, vol. 15, no. 7, pp. 1-19, jul., 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-8994/15/7/1437>
- [27] X. Yao *et al.*, “A Practical Approach to Alignment and Error Feedback Control for Long-Span Arch Bridges”, *Buildings*, vol. 14, no. 7, pp. 1-14, jul., 2024, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/7/1995>

- [28] S. Li and X. Zhang, "Research on Construction Elevation Control of Wide-with Cable-Stayed Bridge with Low Pylon", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, IOP Publishing Ltd, pp. 1-6, jun., 2021. [Online]. Available: doi: 10.1088/1755-1315/783/1/012056
- [29] G. Feng, X. Chen, and C. Liu, "Sensitivity Analysis of Construction Control Parameters for Long-Span Hybrid Girder Rigid Frame Bridges," *Prest. Techno.*, vol. 2023, no. 02, pp. 1-10, jun., 2023, [Online]. Available: <https://ptmc.tongji.edu.cn/yyljs/article/abstract/202302001>
- [30] C. W. Kim, S. Kimura, H. Sugiyama, A. Sato, and K. Ono, "Ride comfort and impact factor of a seven-span continuous cable-stayed bridge," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 27, no. 16, pp. 2790-2802, dec., 2024, [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/13694332241269259>

ANEXOS

ANEXO 1. PROCEDIMIENTO PARA CREACIÓN Y COMPARACIÓN DE SUPERFICIE ENVOLVENTE

Con el fin de explicar de una manera detallada el procedimiento empleado para llegar a la superficie envolvente de los casos de estudio, a continuación, se describe el conjunto de pasos a seguir.

1. Consecución, filtrado y digitalización de la información:
 - I. Procesamiento de la información de la carpeta de campo: Para los casos de estudio, se interpretó y digitalizó la información de las carteras de campo, de forma que se llegara a una tabla con coordenadas Este, norte y cota, en formato .csv. Ver Fig. 1 y Fig. 2 Anexo 1.

Revisión Cotas Losa Fundida Luz 1

LEVANTAMIENTO DE PUNTOS COORDENADOS: 29/10/7/2023

Puntos coordenados de diseño				Puntos coordenados de campo			Evaluación Diseño - Campo					
PUNTO	ESTE	NORTE	COTA	PUNTO	ESTE	NORTE	COTA	DIF ESTE	DIF NORTE	DIF COTA	IRVATOR V	IRVATOR G
K0+144	826953.306	1172039.652	1700.33	K0+144	826953.306	1172039.652	1700.330	0.000	0.000	0.000		
K0+150	826956.306	1172044.365	1701.185	K0+150	826956.306	1172044.365	1701.185	0.000	0.000	0.000		
K0+155	826958.762	1172049.209	1701.94	K0+155	826958.762	1172049.209	1701.940	0.000	0.000	0.000		
K0+160	826961.241	1172053.552	1702.674	K0+160	826961.241	1172053.552	1702.674	0.000	0.000	0.000		
K0+165	826964.067	1172058.502	1703.565	K0+165	826964.067	1172058.502	1703.565	0.000	0.000	0.000		
K0+170	826959.395	1172036.131	1699.92	K0+170	826959.395	1172036.131	1699.920	0.000	0.000	0.000		
K0+180	826962.379	1172041.587	1700.848	K0+180	826962.379	1172041.587	1700.848	0.000	0.000	0.000		
K0+185	826964.846	1172045.736	1701.618	K0+185	826964.846	1172045.736	1701.618	0.000	0.000	0.000		
K0+190	826967.32	1172050.081	1702.411	K0+190	826967.32	1172050.081	1702.411	0.000	0.000	0.000		
K0+195	826970.163	1172055.021	1703.265	K0+195	826970.163	1172055.021	1703.265	0.000	0.000	0.000		

FIG. 1 ANEXO 1. EJEMPLO CARTERA TOPOGRÁFICA DE CAMPO CASO DE ESTUDIO 3.

826953.306,1172039.652,1700.33
826956.306,1172044.365,1701.185
826958.762,1172049.209,1701.94
826961.241,1172053.552,1702.674
826964.067,1172058.502,1703.565
826959.395,1172036.131,1699.92
826962.379,1172041.587,1700.848
826964.846,1172045.736,1701.618
826967.32,1172050.081,1702.411
826970.163,1172055.021,1703.265

FIG. 2 ANEXO 1. DATOS DE CAMPO DIGITALIZADOS EN FORMATO .CSV.

- II. Consecución o digitalización del diseño de la superestructura del puente: De contarse con el plano en formato “dwg” (Archivo ejecutable con el programa Civil 3D) de la implantación del puente, se puede hacer uso de este como base para el archivo donde se realizará la modelación de la envolvente. En caso de que solo se cuente con el plano en formato pdf con coordenadas del tablero, se realiza de igual manera la digitalización de las coordenadas de posición y altura en formato .csv. Ver *Fig. 3 Anexo 1.*

1184567.38846335,831967.85448031,1497.65805099895
1184569.54196364,831963.342004656,1498.06017674673
1184571.69546392,831958.829529002,1498.4623024945
1184573.8489642,831954.317053348,1498.86442824228
1184576.00246449,831949.804577694,1499.26655399005
1184578.15596477,831945.29210204,1499.66867973783
1184580.30946506,831940.779626386,1500.0708054856
1184582.46296534,831936.267150732,1500.47293123338
1184584.61646562,831931.754675078,1500.87505698116
1184586.76996591,831927.242199424,1501.27593245275
1184588.92346619,831922.72972377,1501.65535080593
1184591.07696647,831918.217248116,1502.00624525642
1184593.23046676,831913.704772462,1502.32861580423
1184595.38396704,831909.192296808,1502.62246244936

FIG. 3 ANEXO 1. FRAGMENTO DE LA TABLA DE COORDENADAS DISEÑO ORIGINAL CALZADA DERECHA CASO DE ESTUDIO 2.

2. Importación de los datos al software Civil 3D:
- I. Para poder importar los datos, primero se crean dos conjuntos de puntos en el programa Civil 3D, una para los datos reales y otra para los de diseño. En la pestaña de prospecto -> *Point Groups* -> *Clic der.* -> *New group* -> Se abre la siguiente pestaña desplegable, donde se crean cada uno de los grupos mencionados anteriormente. Ver *Fig. 4 Anexo 1.*

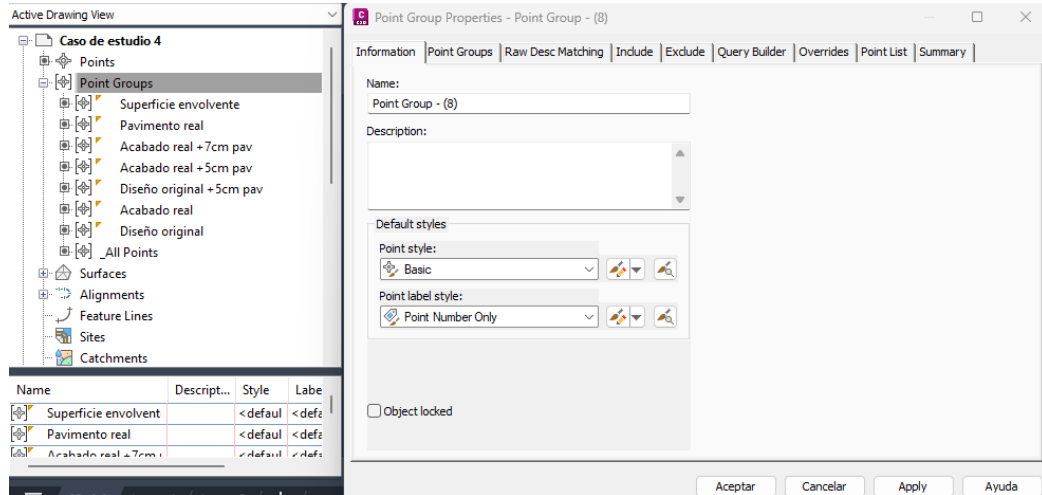


FIG. 4 ANEXO 1. VENTANA DESPLEGABLE PARA LA CREACIÓN DE PUNTOS EN EL SOFTWARE CIVIL 3D.

- II. Ya con los grupos de puntos creados para la superficie de acabado real y los datos de diseño, se pasa a la ventana de *Inster -> Import -> Point from file ->* Se despliega una ventana en la cual, en la parte superior dando clic en el símbolo de “+”, se selecciona el archivo creado en formato .csv, posteriormente, se escoge el formato de punto en el cual está organizado el archivo y finalmente se adiciona el listado de coordenadas al grupo de puntos correspondiente. Ver *Fig. 5 Anexo 1.*

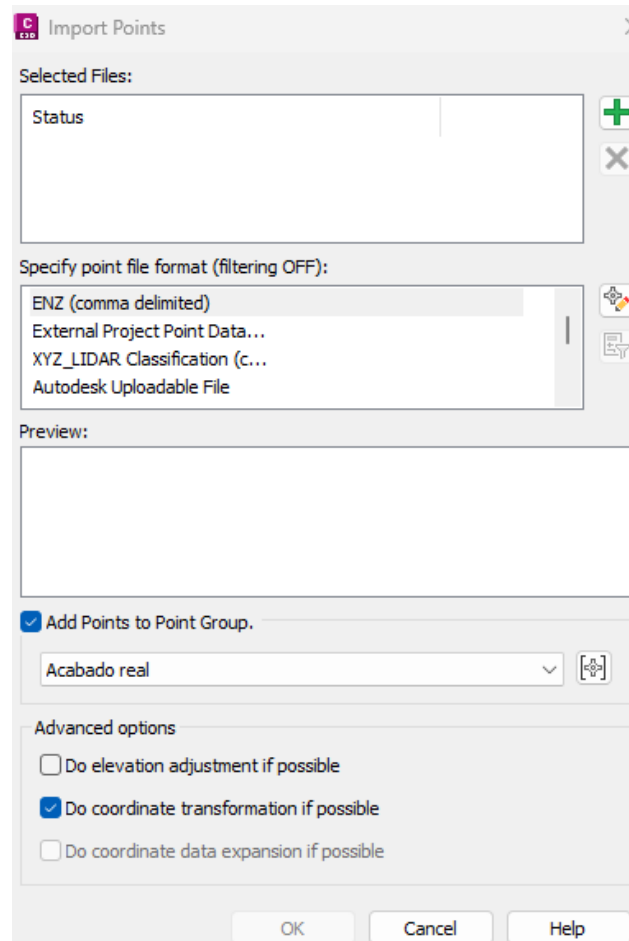


FIG. 5 ANEXO 1. VENTANA DESPLEGABLE PARA LA IMPORTACIÓN DE ARCHIVOS DE PUNTOS EN CIVIL 3D.

3. Creación de superficies de acabado real y diseño original:

- I. Para poder graficar los puntos y con estos hacer una superficie, de manera que se evidencie que la importación ha sido exitosa, se crean las superficies del acabado real del tablero y su diseño original. Para esto, se sigue el siguiente procedimiento: *Ventana Prospector -> Surface -> Clic der. -> New Surface ->* Se despliega la siguiente ventana, en la cual podemos nombrar la superficie y escoger su estilo de visualización. Ver *Fig. 6 Anexo 1*.

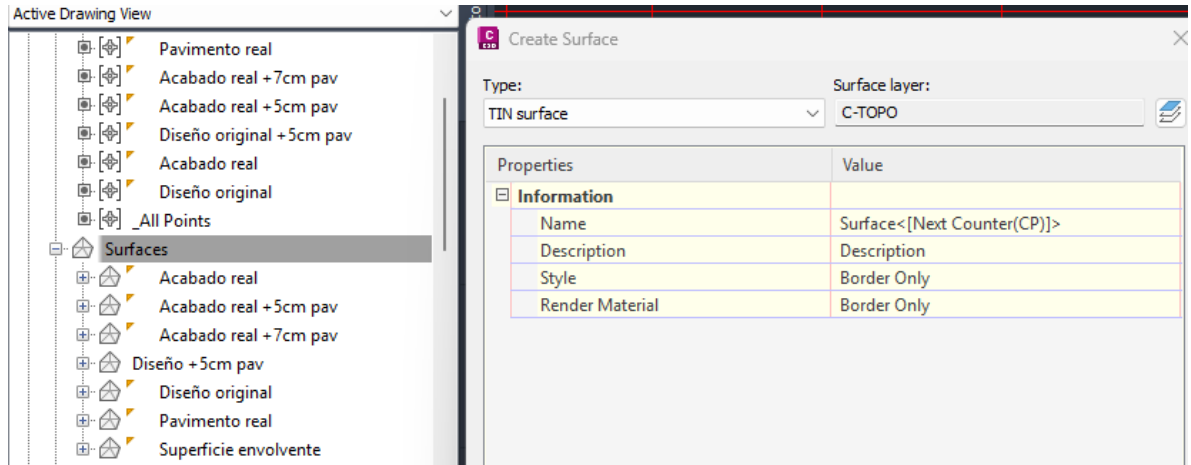


FIG. 6 ANEXO 1. VENTANA DESPLEGABLE PARA CREACIÓN DE SUPERFICIES EN CIVIL 3D.

- II. Con las superficies creadas, se deben adicionar los datos de puntos importados para cada una de ellas, de la siguiente manera: En la pantalla de *Prospector* -> *Surface* -> *Clic* en la superficie a agregar los datos -> *Definition* -> *Point Groups* -> *Clic der.* -> *Add* -> Seleccionar el conjunto de puntos. Ver Fig. 7 Anexo 1.

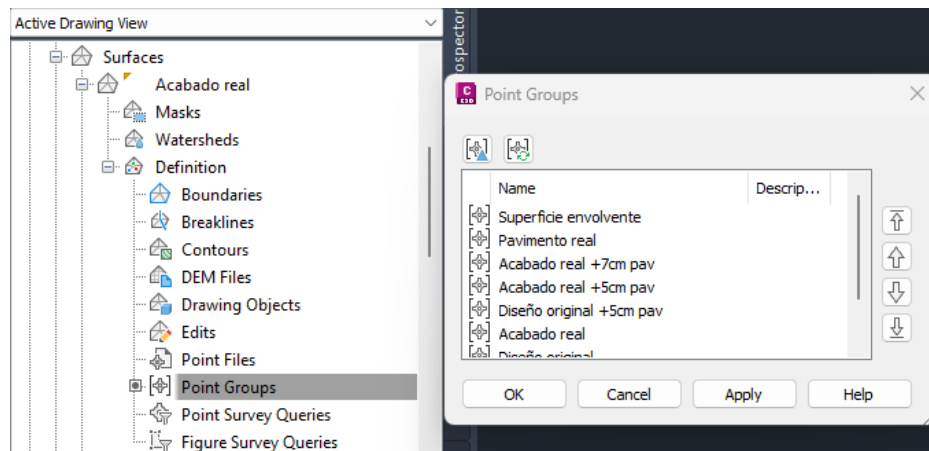


FIG. 7 ANEXO 1. ADICIÓN DE GRUPO DE PUNTOS A LA SUPERFICIE DE ACABADO REAL Y DE DISEÑO EN CIVIL 3D.

- III. Para verificar que el paso anterior se haya ejecutado correctamente, se ejecutan lo siguiente pasos: *Clic der.* en la superficie creada -> *Select* -> en la pantalla del modelo -> *Clic der.* -> *Object viewer*. Ver Fig. 8 Anexo 1.

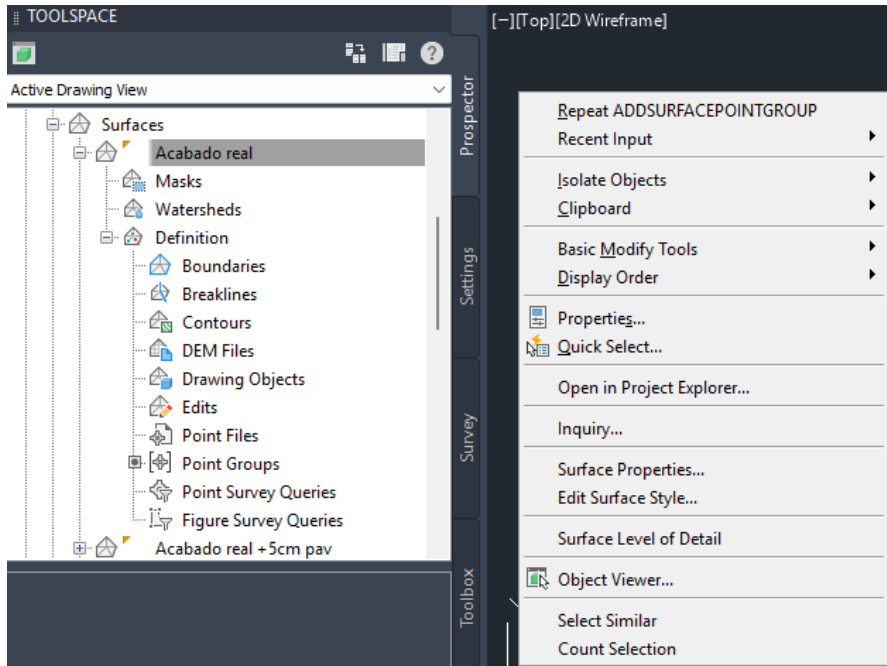


FIG. 8 ANEXO 1. VENTANA DESPLEGABLE CON COMANDO OBJECT VIEWER EN CIVIL 3D.

- IV. Con el paso anterior, se debería desplegar un visor en el cual se puede apreciar la superficie creada. Ver Fig. 9 Anexo 1.

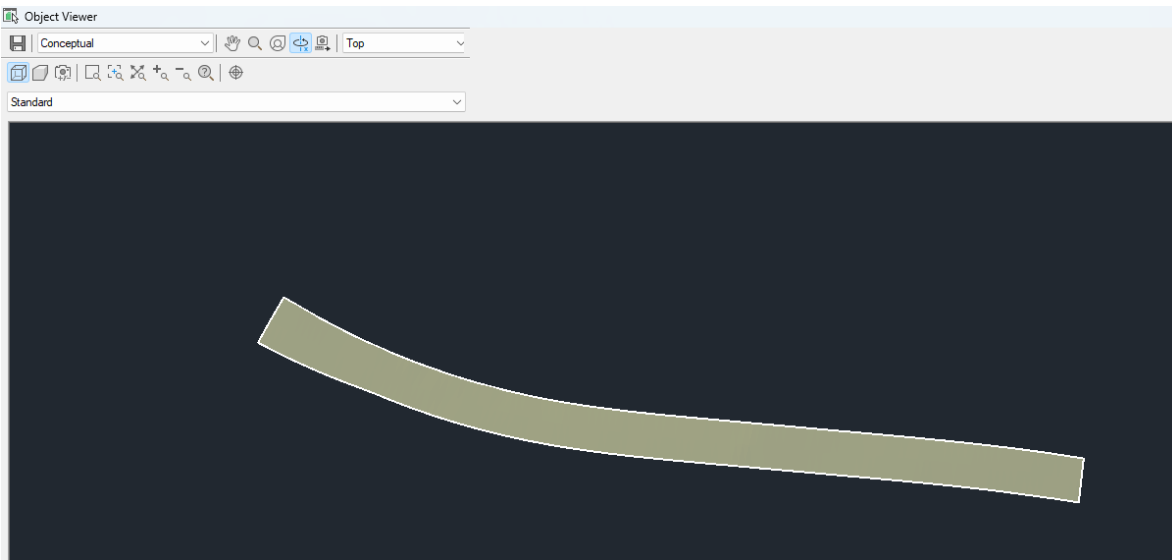


FIG. 9 ANEXO 1. OBJECT VIEWER DEL ACABADO REAL DEL PUENTE CASO DE ESTUDIO 4 EN CIVIL 3D.

4. Definición del alineamiento horizontal del trazado:

- I. Se debe definir el alineamiento del tablero, con el fin de poder sacar posteriormente el perfil longitudinal del mismo. Para lo anterior, se puede separar del archivo de coordenadas de diseño, solo la información correspondiente al eje de la superestructura y al igual que los pasos anteriores, importar los puntos y con estos, trazar una polilínea con el comando *PLINE*. Ver *Fig. 10 Anexo 1*.

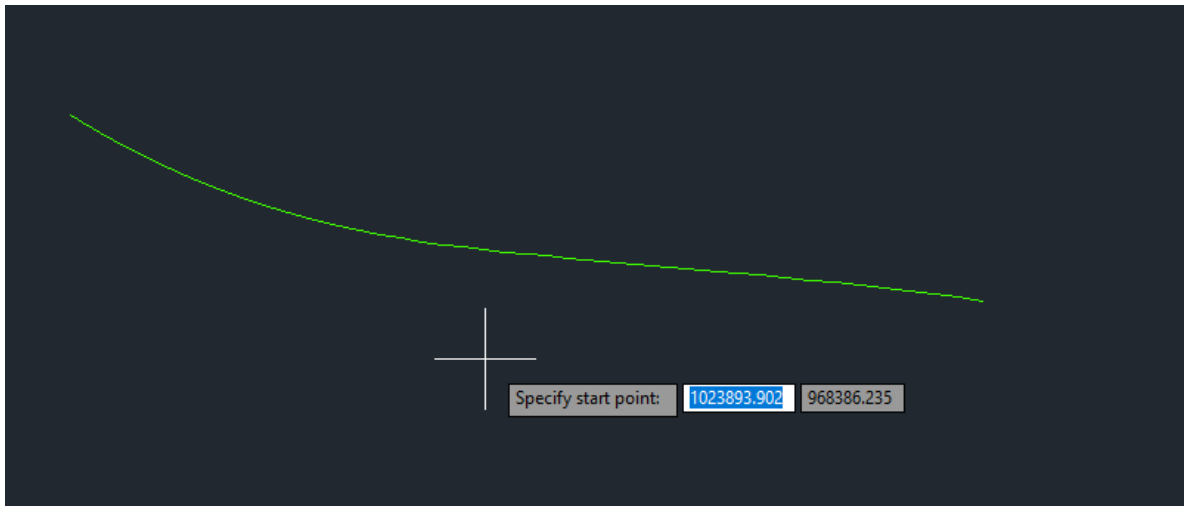


FIG. 10 ANEXO 1. CREACIÓN DE POLILÍNEA CON LOS PUNTOS COORDENADOS POR EL EJE DEL TRAZADO EN CIVIL 3D.

- II. Con la polilínea creada, se genera el alineamiento de la siguiente manera: *Home -> Create Design -> Alignment -> Create Alignment from objects*. Al dar *clic* en esta opción, se activa el cursor para seleccionar la polilínea anteriormente creada. Una vez hecho esto, podemos escoger el nombre del alineamiento, su sentido y el abscisado inicial si este no comienza en cero. Ver *Fig. 11 Anexo 1*.

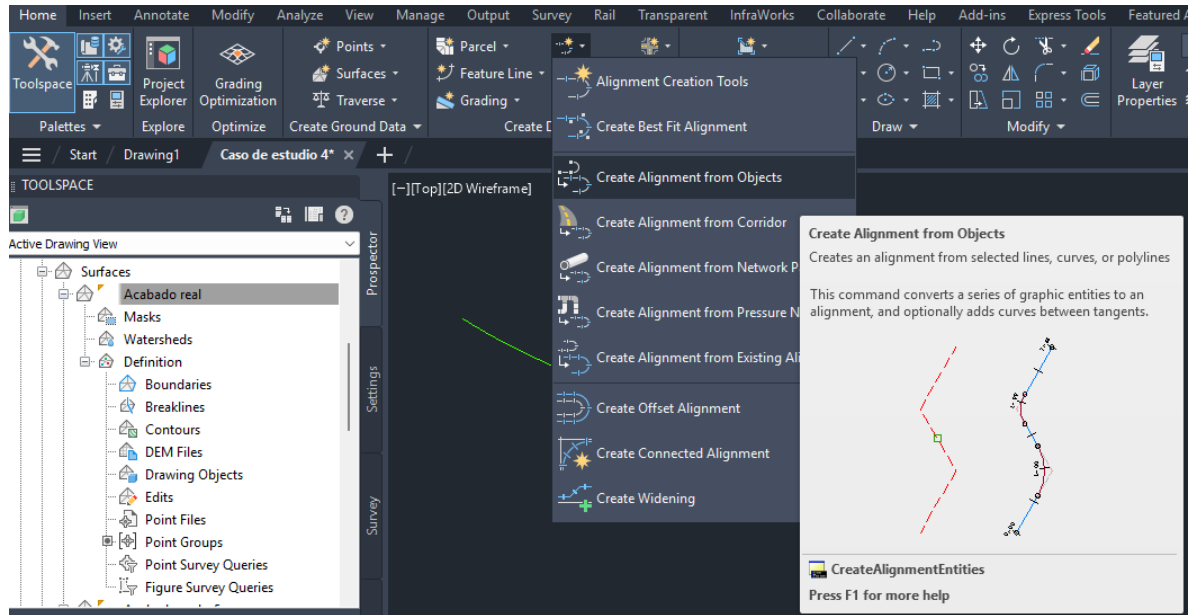


FIG. 11 ANEXO 1. CREACIÓN DE ALINEAMIENTO HORIZONTAL EN CIVIL 3D.

5. Creación del perfil vertical longitudinal de diseño y acabado real:
 - I. Una vez realizada la creación del alineamiento, procedimiento explicado en el paso anterior, se procede con la creación del perfil de superficie de la siguiente manera: *Home -> Create Design -> Profile -> Create Surface Profile ->* Aquí, se abre una ventana desplegable en donde podremos escoger el alineamiento en caso de tener varios y las superficies que deseamos muestrear en ese perfil, así como el estilo y propiedades que queremos asignar a cada una de ellas. Ver Fig. 12 Anexo 1. Ventana de creación de perfil de superficie Caso de estudio 2 en civil 3D.

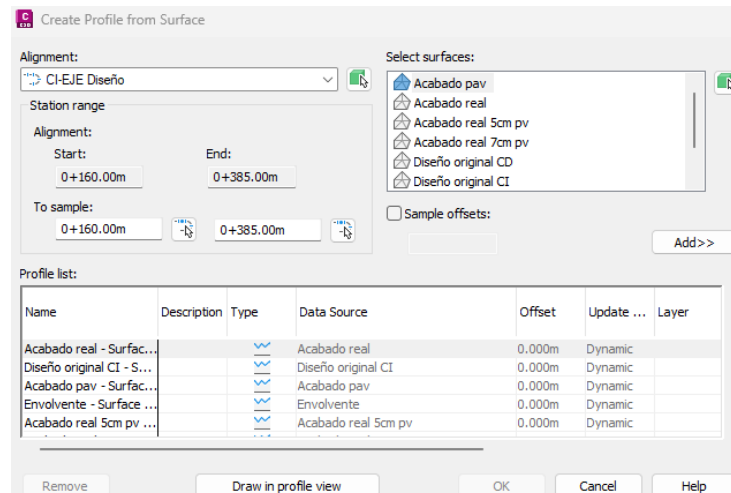


FIG. 12 ANEXO 1. VENTANA DE CREACIÓN DE PERFIL DE SUPERFICIE CASO DE ESTUDIO 2 EN CIVIL 3D.

- II. Con el perfil de superficie creado, el cual debe contar con las superficies creadas de diseño y acabado real, el paso a seguir es crear la vista del perfil longitudinal de la siguiente manera: *Home -> Profile & Section Views -> Create Profile View ->* Se nos abrirá una ventana desplegable, en donde seleccionaremos el perfil, el cual ya tendrá las superficies asociadas gracias al paso anterior. Ver Fig. 13 Anexo 1.

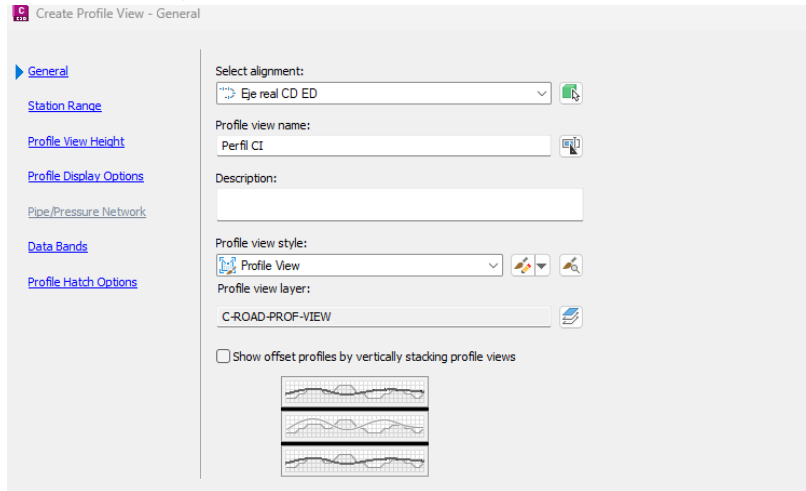


FIG. 13 ANEXO 1. CREACIÓN DE VISTA DE PERFIL LONGITUDINAL EN CIVIL 3D.

- III. Culminado el paso anterior, se nos habilita el cursor para poder elegir donde insertar el gráfico. Ver Fig. 14 Anexo 1.

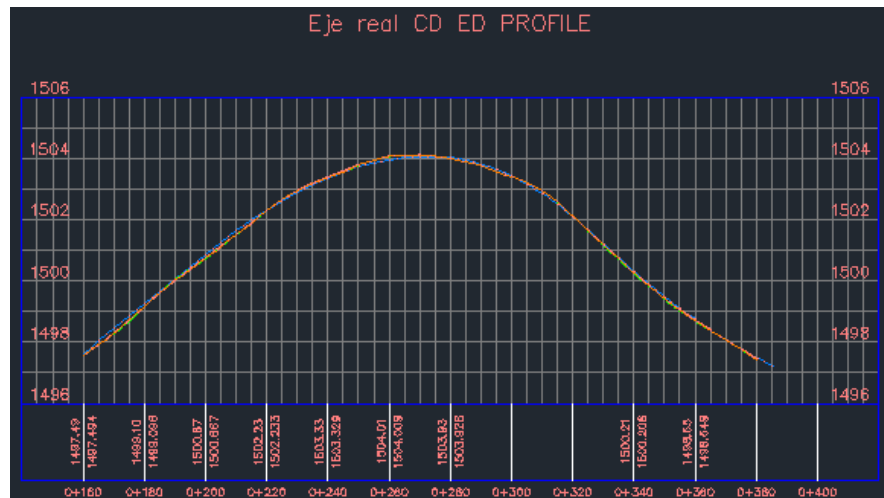


FIG. 14 ANEXO 1. PERFIL LONGITUDINAL CALZADA DERECHA PUENTE CASO DE ESTUDIO 2 EN CIVIL 3D.

6. Evaluación gráfica de las diferencias y creación de las líneas guías para el desarrollo de la envolvente.
- I. Verificadas las diferencias significativas a lo largo del trazado, se establecen unas líneas guías, las cuales servirán de límite inferior y parámetro superior

para trazar la envolvente. Generalmente, la línea inferior debe ser un offset del acabado de rasante más 5 cm (espesor mínimo de capa de rodadura); mientras que el límite superior es a criterio, teniendo en cuenta las irregularidades a matizar y el nivel máximo de sobre espesor objetivo, con el fin de evitar el aumento desmedido de la carga muerta. Para los casos de estudio se utilizaron offset entre más 7 u 8 cm. En la Fig. 15 Anexo 1., se presenta a manera de ejemplo un zoom de las desviaciones encontradas para el caso de estudio 2, siendo la línea roja el acabado real y la azul el diseño original.

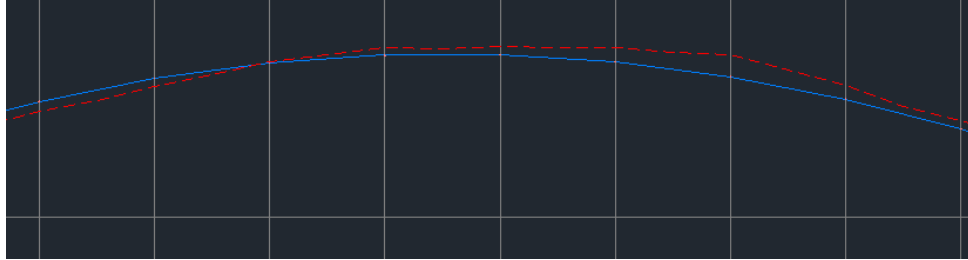


FIG. 15 ANEXO 1. DESVIACIONES CRÍTICAS CONSTRUCTIVAS IDENTIFICADAS EN EL CASO DE ESTUDIO 2.

- II. Con las distancias de offset para las líneas guía definidas, se debe iniciar desde los primeros pasos (1. II), haciendo una copia a la cartera digitalizada del acabado de campo y modificando las cotas adicionándole el espesor mínimo de carpeta (Límite inferior) y otro archivo con las cotas de espesor máximo de carpeta (Límite superior). De esta manera, se tienen dos carteras nuevas con las cotas guía inferior y superior para el trazado de la envolvente.
- III. Una vez creados estos dos archivos, se siguen los pasos 2, 3 y 5, adicionando estas dos nuevas superficies de límite inferior y superior para la envolvente al perfil existente ya graficado. De esta manera, se tiene un perfil con: acabado real, diseño original, acabado real + espesor mínimo y acabado real + espesor máximo. Ver Fig. 16 Anexo 1. Donde la línea azul corresponde al diseño original, la roja punteada el acabado original, la rosa acabado original +5cm y la roja continua +7cm.

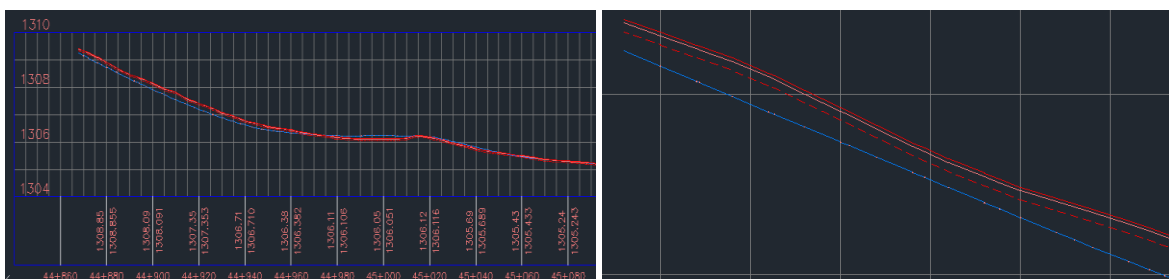


FIG. 16 ANEXO 1. PERFIL LONGITUDINAL CON LÍNEAS GUÍA PARA TRAZADO DE ENVOLVENTE CASO DE ESTUDIO 4.

7. Creación de la propuesta de envolvente:

- I. Una vez las guías se encuentran en el gráfico, se puede comenzar a trazar el perfil de envolvente, tratando de ir realizando las líneas y sus quiebres siempre por encima de la línea inferior y tratando de no superar en exceso el límite superior. Para esto, se siguen los siguientes pasos: *Home -> Create Design -> Profile -> Profile Creation Tools ->* Se abre una ventana desplegable en la cual podemos escoger el nombre del perfil nuevo y su estilo de diseño. Ver Fig. 17 Anexo 1.

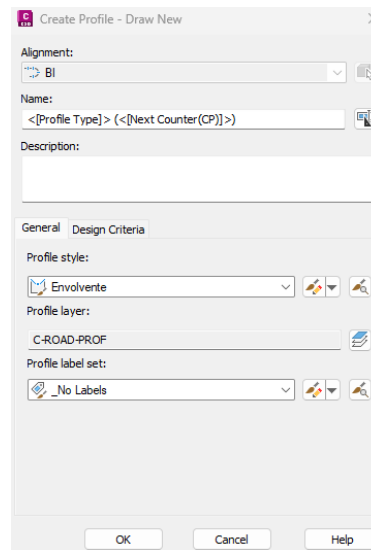
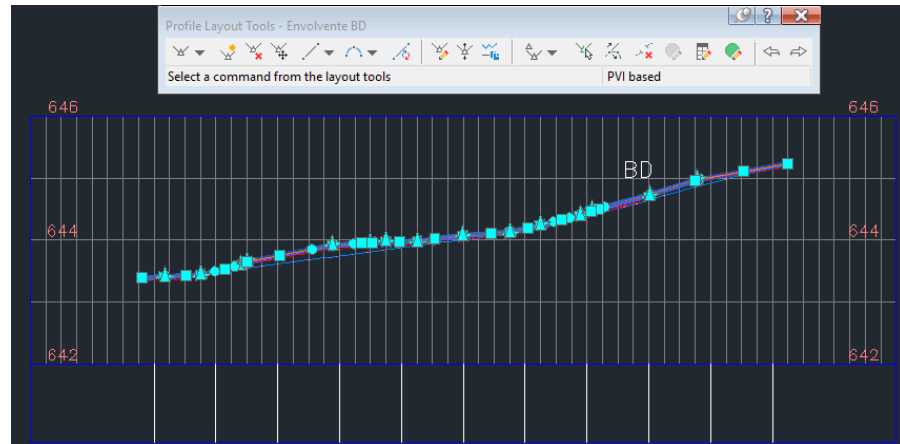


FIG. 17 ANEXO 1. VENTANA PARA CREACIÓN DE PERFIL USADO EN ESTE CASO PARA LA ENVOLVENTE EN CIVIL 3D.

- II. Una vez determinadas las propiedades, se despliega un cuadro de comandos que permiten el trazado de nuestra envolvente. Ver Fig. 18 Anexo 1. Es importante iniciar con el comando *snap* en la línea guía de espesor mínimo y de ahí en adelante, ir trazando líneas que suavicen los quiebres del acabado natural. El cuadro de comandos da la opción de diseñar curvas para los puntos de quiebre si se desea, para los ejercicios realizados en los casos de estudio, debido a los bajos cambios de pendiente, se descartó esta opción. En los casos que se deban solventar grandes crestas o depresiones, se puede sobrepasar el límite de la guía superior, sin embargo, se debe propender volver a incorporarse a las guías tan pronto la geometría lo haga posible, esto con el fin de no generar grandes sobre espesores. Finalmente, para rematar el perfil, se sugiere cerrarlo con el *snap* al punto de la guía final de espesor mínimo.



**FIG. 18 ANEXO 1. CUADRO DE COMANDOS PARA CREACIÓN DE PERFIL ENVOLVENTE
CASO DE ESTUDIO 1 EN CIVIL 3D.**

- III. Para mayor precisión en el ejercicio de creación de la superficie envolvente, se debe realizar el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero para los bordes izquierdo y derecho. Para esto, es necesario crear unos alineamientos para cada borde de vía, de la siguiente manera: *Home -> Create Disgn -> Alignment -> Create Offset Algnment* -> Nos dará la opción de seleccionar el alineamiento al cual haremos el comando *Offset* o si damos *Enter*, se podrá escoger de una lista desplegable. Ver *Fig. 19 Anexo 1*. En esta cinta, podremos escoger la distancia al eje para cada costado y el nombre del nuevo alineamiento.

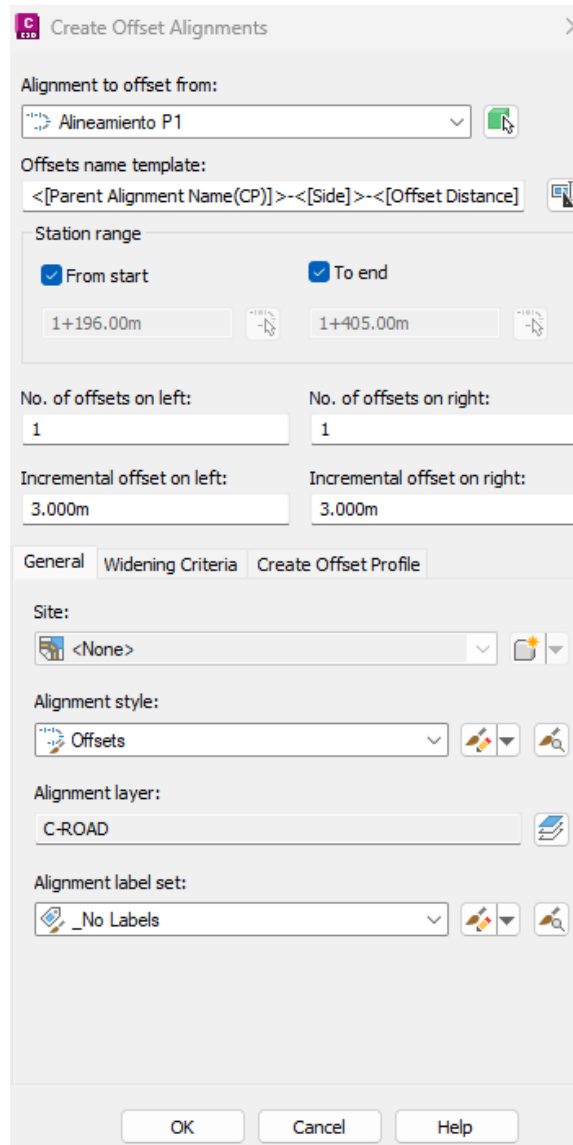


FIG. 19 ANEXO 1. VENTANA PARA CREACIÓN DE ALINEAMIENTOS PARALELOS AL EJE EN CIVIL 3D.

- IV. Creados los alineamientos para los bordes de vía, se repiten todos los pasos anteriores hasta la realización de la envolvente para cada uno de ellos. Ver Fig. 20 Anexo 1.

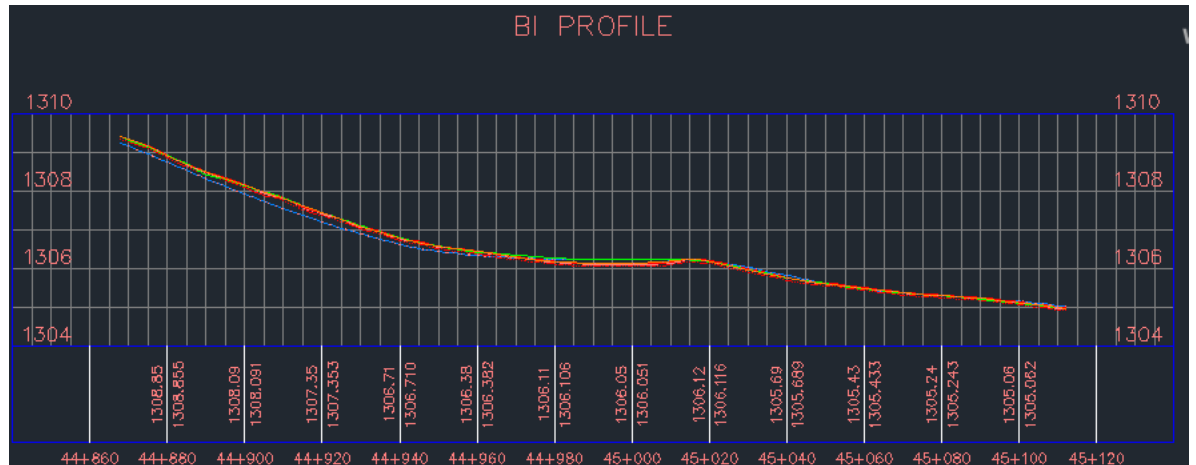


FIG. 20 ANEXO 1. CREACIÓN DE ENVOLVENTE BORDE DE VÍA IZQUIERDO CASO DE ESTUDIO 4.

- V. Ahora, con los perfiles envolventes creados para el eje y bordes de vía, se debe exportar la información a un archivo tipo Excel, para combinar los datos en una sola tabla de coordenadas y poder hacer la exportación nuevamente al civil para la creación de la superficie. Para esto, se siguen los siguientes pasos: Panel *Toolbox* -> *Reports Manager* -> *Profile* -> *Incremental Station Elevation Report* -> Se abre una ventana desplegable en donde en la parte superior escogeremos el perfil de envolvente que deseamos, abajo seleccionaremos la superficie de acabado real para comparar la diferencia de cotas (Espesor de pavimento) y finalmente, en la parte inferior izquierda, escogeremos el intervalo de estaciones al cual queremos la información (Se sugiere cada 5m) y la ubicación y formato en el cual se guardará el archivo (Seleccionar Excel). Ver *Fig. 21 Anexo 1*.

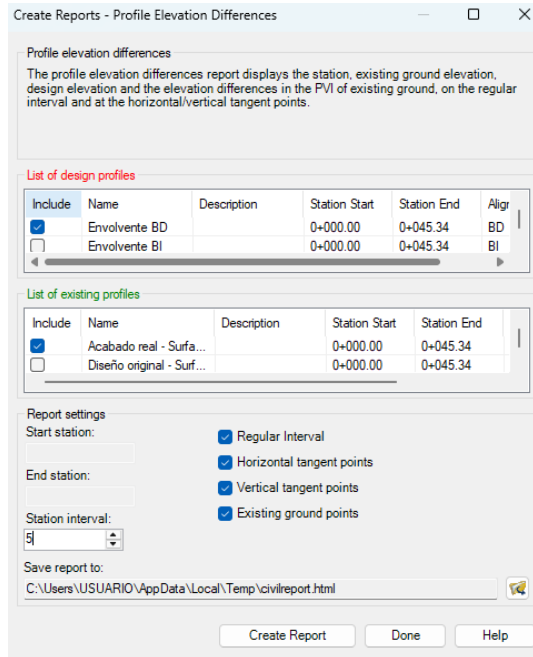


FIG. 21 ANEXO 1. VENTANA EMERGENTE PARA EXPORTACIÓN DE PERFILES EN ARCHIVOS EDITABLES EN CIVIL 3D.

- VI. Culminado el paso anterior, se generará un archivo tipo Excel con la información de coordenadas, abscisas, cotas y comparativos con la superficie escogida, en este caso el acabado real. Vale aclarar que, en el paso anterior, se pueden escoger varias superficies comparativas, como lo puede ser también el diseño original y así en el mismo informe comprobar sus diferencias de cotas. Esta información nos será útil en pasos posteriores. Ver Fig. 22 Anexo 1.

Profile Elevation Differences Report

Client: Prepared by:
Client Preparer
Client Company Your Company Name
Address 1 123 Main Street
Date: 14/06/2025 6:40:04 p. m.

Vertical Alignment: Envoltente eje
Existing Profile: Acabado real - Surface (5)
Description:
Station Range: Start: 0+000.00, End: 0+045.34

PVI	Station	Easting	Northing	Elevation Existing	Elevation Design	Elevation Difference	Point Type
0	0+000.00	826956.3555	1172037.892	1,700.125m	1,700.175m	-0.050m	Start
1	0+002.90	826957.7909	1172040.407	1,700.577m	1,700.629m	-0.052m	Existing
2	0+003.61	826958.1426	1172041.023	1,700.682m	1,700.740m	-0.058m	PVI
3	0+005.00	826958.8336	1172042.234	1,700.888m	1,700.942m	-0.053m	Regular
4	0+005.89	826959.2746	1172043.007	1,701.020m	1,701.070m	-0.050m	Existing
5	0+008.57	826960.6016	1172045.333	1,701.385m	1,701.457m	-0.073m	Existing
6	0+010.00	826961.3116	1172046.577	1,701.614m	1,701.664m	-0.050m	Regular

FIG. 22 ANEXO 1. EJEMPLO DE REPORTE DE PERFIL ENVOLVENTE GENERADO EN ARCHIVO TIPO EXCEL CASO DE ESTUDIO 3.

- VII. Se deben exportar los datos para los tres perfiles envolventes (Eje, borde derecho y borde izquierdo) y compilar la información en un solo archivo con las columnas de coordenadas y cotas. De igual manera, se debe depurar la información, asegurándose que los datos estén en formato numérico y no se encuentren repetidos. Se concatena la información y se guarda en un archivo tipo .csv para poder realizar la importación al Civil 3D, repetir los pasos de creación de grupo de puntos y de superficie. Ver *Fig. 23 Anexo 1*.

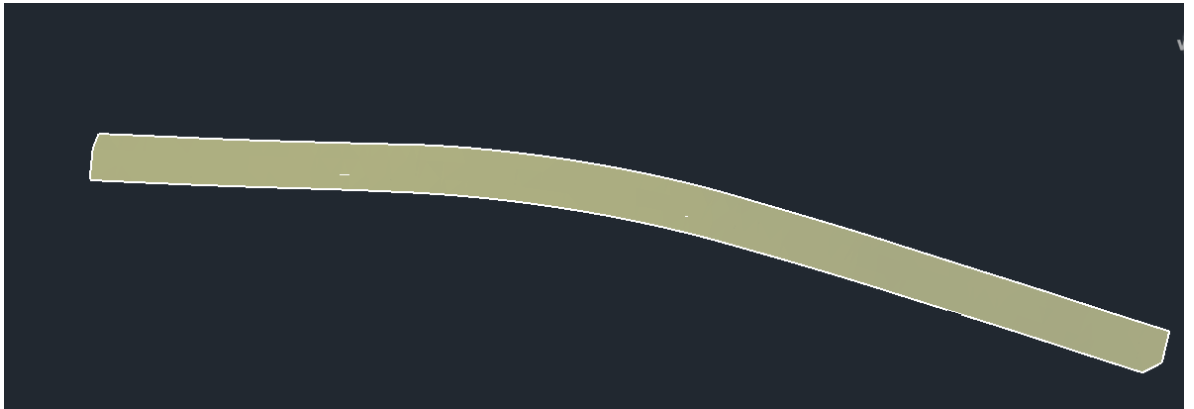


FIG. 23 ANEXO 1. SUPERFICIE ENVOLVENTE CASO DE ESTUDIO 2.

8. Creación de superficie comparativa:
- I. Para esto se tienen dos escenarios:
 - i. Se cuenta con la cartera de acabado de pavimento real: En este caso, se siguen los pasos 1, 2, 3 y 5 para crear la superficie con estos datos y añadir la superficie al perfil longitudinal.
 - ii. No se cuenta con información sobre el acabado real: Se estima entonces una nueva superficie de acabado de pavimento de acuerdo a la metodología pragmática usada generalmente en el medio, la cual es la superposición del diseño a la máxima irregularidad. Para identificar este valor, se puede realizar de manera gráfica usando el perfil ya creado o a través de los archivos de coordenadas en Excel, haciendo una columna con la diferencia de cotas entre el acabado real y el diseño para las mismas abscisas. Las nuevas coordenadas para la superficie comparativa de la envolvente, serán entonces el resultado de sumar a los datos de diseño la diferencia máxima del acabado, logrando así la superposición. Con esta nueva cota, se genera un nuevo archivo .csv y se realizan los pasos 1, 2, 3 y 4. Ver *Fig. 24 Anexo 1*.

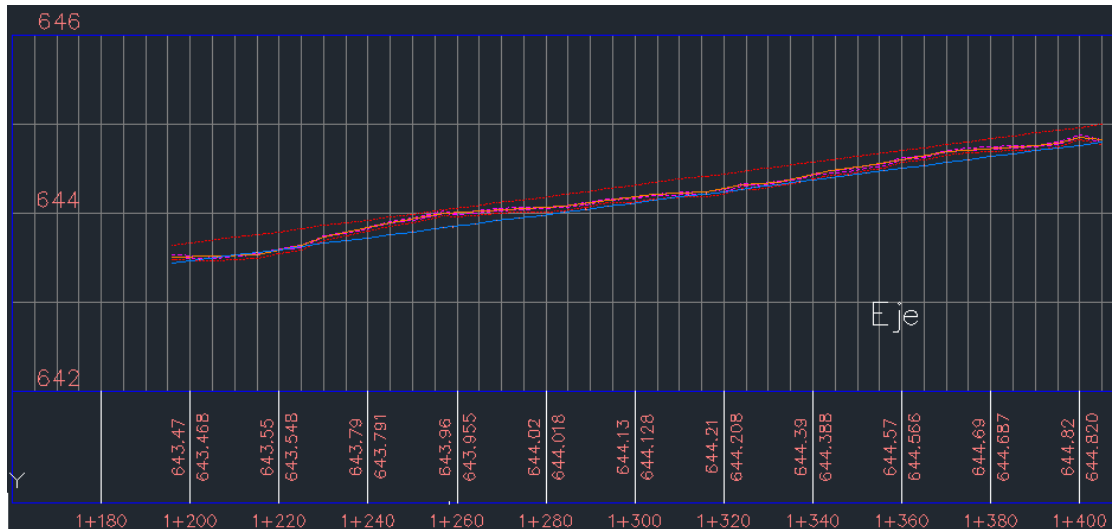


FIG. 24 ANEXO 1. CREACIÓN DE SUPERFICIE COMPARATIVA A MÁXIMA DESVIACIÓN DEL ACABADO CASO DE ESTUDIO 1.

9. Comparativo de superficie envolvente vs acabado real de pavimento o superposición de diseño al máximo error.
 - I. Para comprobar la bondad de reducción volumétrica de la carpeta de rodadura con la propuesta de envolvente, se realiza la comparación de volúmenes del pavimento propuesto contra el acabado real de pavimento o la superficie superpuesta al máximo error en el caso de no contar con la información. Para esto, se crearán secciones transversales y se calcularán los volúmenes de pavimento para cada uno de los escenarios.
 - II. Para crear las secciones transversales, primero se deben generar las líneas de muestreo a lo largo del alineamiento. Se deben seguir los siguientes pasos: *Home -> Profile & Section Views -> Sample lines ->* Al dar *Clic* no saldrá la opción seleccionar el alineamiento o al dar *Enter*, escogerlo de un listado desplegable -> Seleccionado el alineamiento, se abrirá una ventana desplegable donde se escogerá el nombre del grupo de secciones y se seleccionarán las superficies a muestrear. Se recomienda realizar este paso dos veces, es decir, crear un grupo de secciones de muestreo para la envolvente con el acabado real de concreto y otro para la superficie comparativa y de nuevo el acabado real. De esta manera, se calcularán los volúmenes en secciones por aparte. Ver *Fig. 25 Anexo 1.*

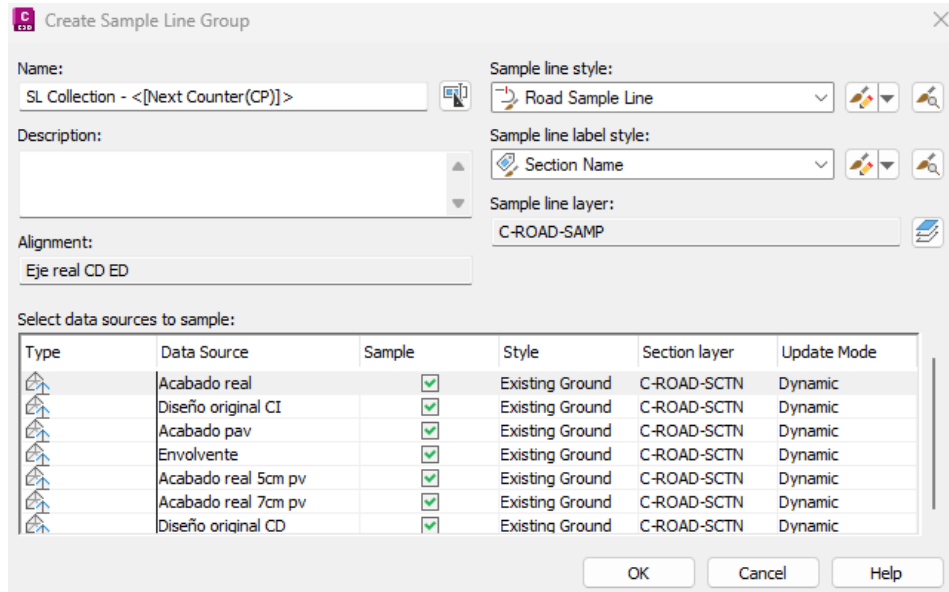


FIG. 25 ANEXO 1. VENTANA PARA CREACIÓN DE GRUPO DE LÍNEAS DE MUESTREO CASO DE ESTUDIO 2 EN CIVIL 3D.

- III. Realizado el paso anterior, se abrirá una ventana de comandos, donde escogeremos la separación entre líneas de muestreo, su abscisa de inicio y final en caso de que no sea todo el alineamiento, así como el ancho hacia la izquierda y derecha de la línea de muestreo. Ver Fig. 26 Anexo 1.

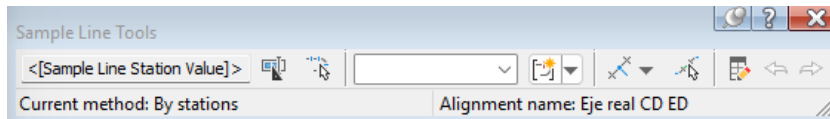


FIG. 26 ANEXO 1. CUADRO DE COMANDOS PARA LÍNEAS DE MUESTREO EN CIVIL 3D.

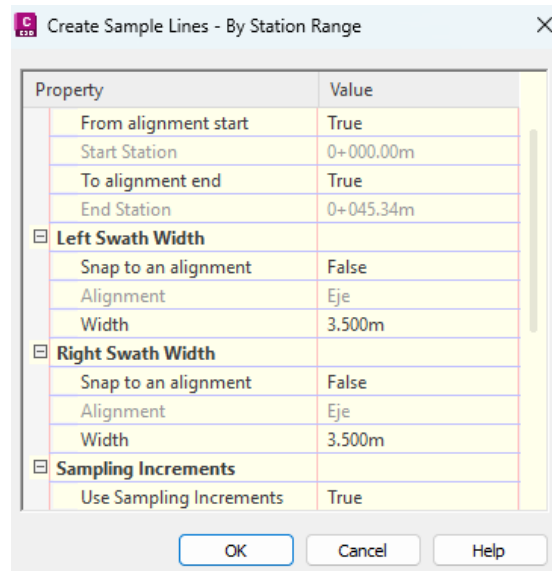


FIG. 27 ANEXO 1. VENTANA PARA CREACIÓN DE LÍNEAS DE MUESTREO POR RANGO DE ESTACIONES EN CIVIL 3D.

- IV. Una vez creadas las líneas de muestreo, se pueden generar las secciones transversales para la superficie envolvente y para la superficie comparativa, de la siguiente manera: *Home -> Profile & Section Views -> Create Multiple Views ->* Se despliega una ventana en la cual podremos escoger el alineamiento, el grupo de líneas de muestreo, el nombre de las secciones a crear, las abscisas entre las cuales queremos las secciones, estilo de ploteado, superficies y estilos de visualización, etc. Ver Fig. 28 Anexo 1.

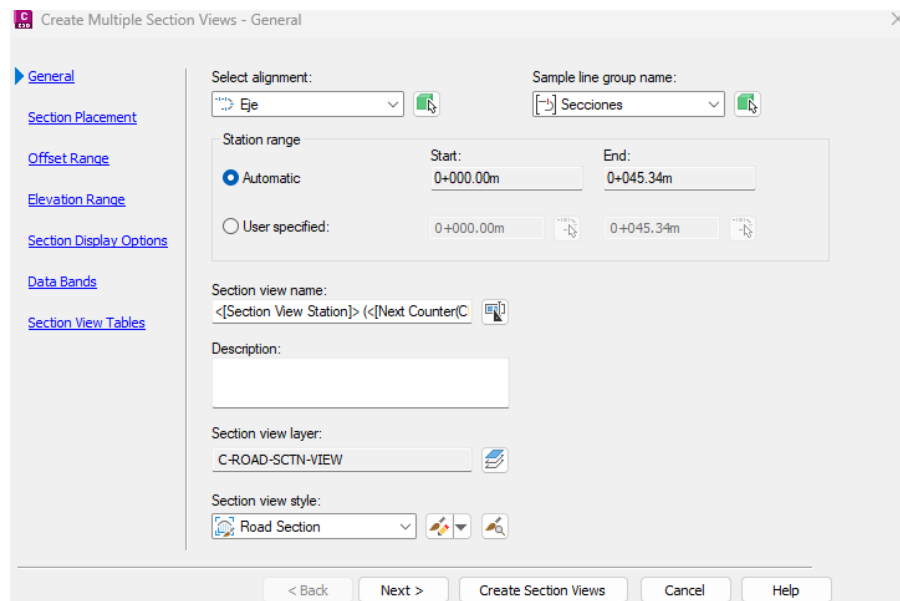


FIG. 28 ANEXO 1. VENTANA PARA CREACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES EN CIVIL 3D.

Se recomienda elegir el estilo de la superficie de acabado real como “terreno existente” y la de la envolvente o superficie comparativa como “terreno finalizado”. Esto con el fin de facilitar la visualización en las secciones. Ver Fig. 29 Anexo 1.

Select sections to draw:




Name	Draw	Label Set	Clip Grid	Style	Overrid...
 Acabado real	<input checked="" type="checkbox"/>	_No Lab...	<input checked="" type="radio"/>	Existing ...	<input type="checkbox"/> <No...
 Superficie envolvente	<input checked="" type="checkbox"/>	_No Lab...	<input type="radio"/>	Finishe...	<input type="checkbox"/> <No...
 Ground Fill	<input checked="" type="checkbox"/>			Fill Mat...	<input type="checkbox"/> <No...

FIG. 29 ANEXO 1. SELECCIÓN DE ESTILOS DE DIBUJO PARA LAS SECCIONES TRANSVERSALES CASO DE ESTUDIO 4 EN CIVIL 3D.

- V. Finalizados los pasos de la ventana desplegable, se debe dar *Clic* en un sitio del modelo donde se quieran insertar el grupo de secciones transversales. Ver Fig. 30 Anexo 1.



FIG. 30 ANEXO 1. SECCIONES TRANSVERSALES DE SUPERFICIE ENVOLVENTE CASO DE ESTUDIO 4 EN CIVIL 3D.

- VI. Con las secciones creadas para la superficie envolvente y también para la superficie comparativa, el paso siguiente, consiste en crear la lista de materiales para el cálculo de volúmenes. Para esto, se siguen los siguientes pasos: *Analyze -> Volumes and Materials -> Compute Materials ->* Se abrirá la siguiente ventana, donde se escogerá el alineamiento y el grupo de secciones transversales. Ver *Fig. 31 Anexo 1*.

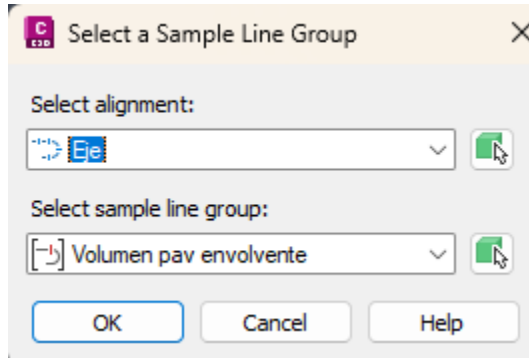


FIG. 31 ANEXO 1. VENTANA DESPLEGABLE PARA SELECCIÓN DE CÁLCULO DE VOLÚMENES EN CIVIL 3D.

Escogido el alineamiento y el grupo de secciones al cual le queremos calcular el volumen, saldrá otra ventana de comandos, donde seleccionaremos la superficie inicial (Acabado real de concreto) y la superficie terminada (Envolvente o superficie comparativa). Con esto, daremos propiedades de lleno a la carpeta de pavimento a calcular. Ver *Fig. 32 Anexo 1*.

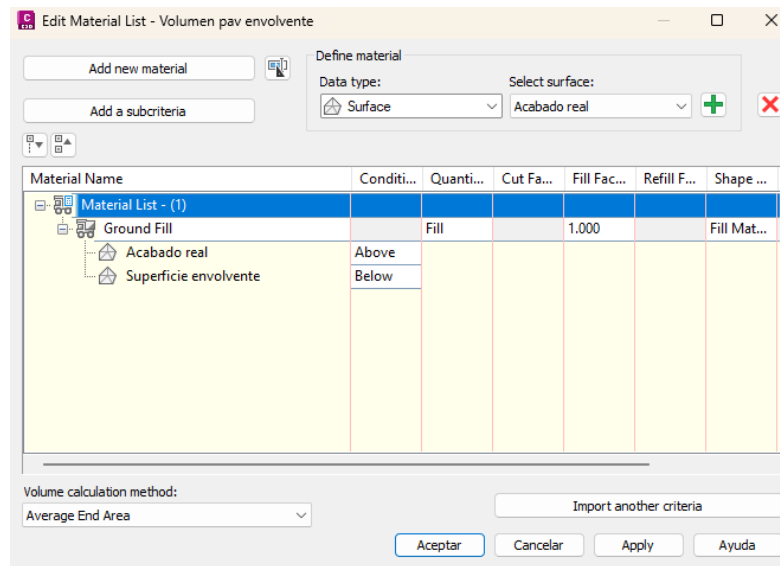


FIG. 32 ANEXO 1. VENTANA PARA ASIGNACIÓN DE MATERIALES CÁLCULO DE VOLÚMENES EN CIVIL 3D.

- VII. Con la lista de materiales creada para cada superficie y secciones, el paso final consiste en insertar la tabla de volúmenes de la siguiente manera: *Analyze -> Volumes and Materials -> Total Volume Table ->* Saldrá una ventana desplegable, donde seleccionaremos el eje, el grupo de secciones y la lista de material creado en el paso anterior. También se podrán elegir el estilo de tabla, su número de columnas, etc. Ver Fig. 33 Anexo 1.

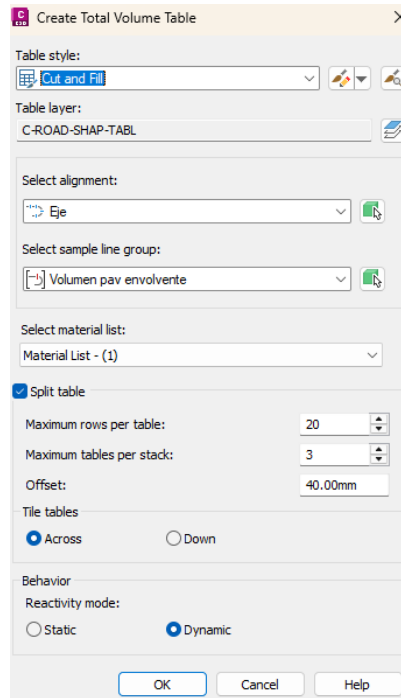


FIG. 33 ANEXO 1. VENTANA DESPLEGABLE PARA INSERTAR TABLA DE VOLÚMENES EN CIVIL 3D.

Terminados los pasos de la ventana desplegable, se da clic en la zona del modelo donde se quiere insertar la tabla. Ver Fig. 34 Anexo 1.

Total Volume Table						
Station	Fill Area	Cut Area	Fill Volume	Cut Volume	Cumulative Fill Vol	Cumulative Cut Vol
44+880.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44+900.00	0.75	0.00	15.24	0.00	15.24	0.00
44+920.00	0.83	0.00	15.82	0.00	31.06	0.00
44+940.00	0.77	0.00	15.93	0.00	46.99	0.00
44+960.00	0.72	0.00	14.89	0.00	61.88	0.00
44+980.00	0.88	0.00	16.05	0.00	77.93	0.00
45+000.00	0.89	0.00	17.69	0.00	95.62	0.00
45+020.00	0.76	0.00	16.47	0.00	112.08	0.00
45+040.00	0.77	0.00	15.34	0.00	127.42	0.00
45+060.00	0.70	0.00	14.78	0.00	142.19	0.00
45+080.00	0.69	0.00	13.94	0.00	156.13	0.00
45+100.00	0.70	0.00	13.93	0.00	170.06	0.00

FIG. 34 ANEXO 1. TABLA DE VOLÚMENES DE CARPETA DE PAVIMENTO ENVOLVENTE CASO DE ESTUDIO 4 EN CIVIL 3D.

10. Evaluación de resultados:

- I. Con la tabla de volúmenes de carpeta para la superficie envolvente y la comparativa (Acabado real de pavimento o superposición a la mayor desviación) se evalúa la cantidad de metros cúbicos de cada una de ellas y si se presenta una reducción para la superficie envolvente.
- II. Regresándose al paso VI y VII del capítulo 7, en donde se exportaron las coordenadas de la envolvente a un archivo tipo Excel, haciendo uso de estos mismos, se realizarán las comparaciones geométricas entre la superficie envolvente y el acabado inicial del concreto del tablero, de forma que se comparen: cambio de pendiente longitudinal, espesores de pavimento y la desviación de los mismos. Ver *Tabla 1 Anexo 1*.

ENVOLVENTE EJE

PVI Station	PVI Elevation	Grade In	Grade Out	A (Grade Change)
K0+000	1700.175		15.67%	
K0+004	1700.74	15.67%	14.46%	1.21%
K0+010	1701.664	14.46%	16.23%	1.78%
K0+012	1701.908	16.23%	15.63%	0.60%
K0+015	1702.386	15.63%	15.19%	0.44%
K0+020	1703.174	15.19%	15.44%	0.25%
K0+022	1703.586	15.44%	14.50%	0.93%
K0+025	1703.929	14.50%	16.30%	1.80%
K0+029	1704.543	16.30%	14.31%	1.99%
K0+034	1705.348	14.31%	15.30%	0.99%
K0+036	1705.702	15.30%	13.17%	2.13%
K0+039	1706.089	13.17%	15.54%	2.37%
45.34	1707.008	15.54%		

TABLA 1 ANEXO 1. CAMBIO DE PENDIENTE LONGITUDINAL EJE ENVOLVENTE CASO DE ESTUDIO 3.

Al realizar estos cálculos de cambio de pendiente entre abscisas también para el acabado original del concreto del tablero, se pueden calcular los datos de máximo y mínimo cambio de pendiente, su desviación promedio y de esta manera comparar la regularidad entre superficies. Así, se logra determinar si se alcanzaron mejorías en el confort y seguridad para el usuario, de una manera numérica y gráfica. Ver *Fig. 35 Anexo 1*.

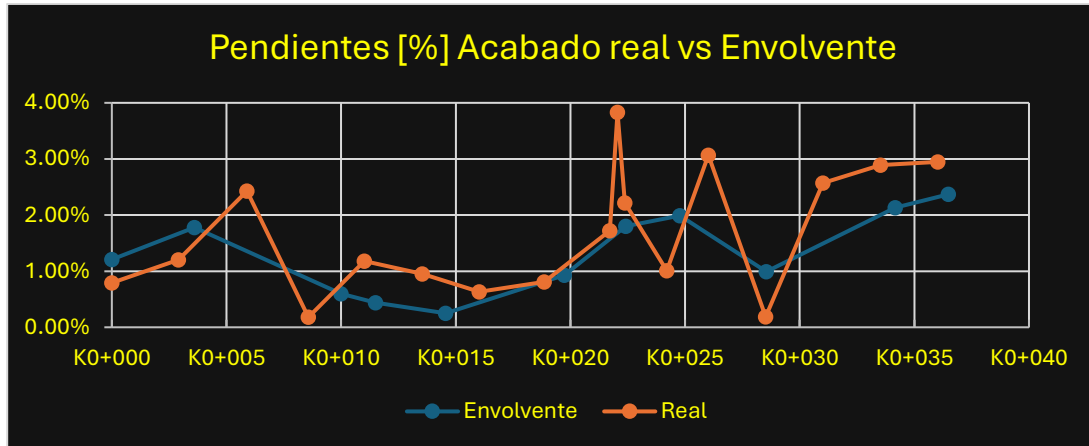


FIG. 35 ANEXO 1. COMPARATIVO DEL CAMBIO DE PENDIENTE LONGITUDINAL CASO DE ESTUDIO 3.