

El viaducto de la Línea 4 del Metro de Santiago: su concepción y diseño

The viaduct of Line 4 of Santiago's subway: its conception and design

Ramón Ross*, Velko Zuvic**

* Proyectos Metros, CADE-IDEPE Ingeniería y Desarrollo de Proyectos, Santiago, CHILE

** Viaducto Línea 4, CADE-IDEPE Ingeniería y Desarrollo de Proyectos, Santiago, CHILE
vzuvic@cadeidepe.cl

Fecha de recepción: 20/ 10/ 2004
Fecha de aceptación: 25/ 11/ 2004

Resumen

Este trabajo detalla el desarrollo del proyecto del viaducto de la denominada Línea 4, que corresponde a una nueva línea del Metro de 32,4 kilómetros de longitud, con un trazado subterráneo, en superficie y elevado, en la ciudad de Santiago de Chile. El diseño del viaducto se ha orientado al uso intensivo de ensamblaje de estructuras prefabricadas (dovelas), con el objeto de minimizar el impacto, en materia de espacio y tiempo, que este tipo de proyecto habitualmente genera sobre la vialidad en torno a su trazado. Ello, además de lograr arquitectónicamente un diseño con formas esbeltas, de trazos suaves, redondeados y armónicas con el entorno. El diseño del viaducto corresponde a una superestructura tipo "U", la cual se construye mediante el ensamblaje de segmentos prefabricados (dovelas). Este método de dovelas es habitual en países desarrollados pero se aplica por primera vez en Chile en un viaducto. Otro tema importante en este proyecto ha sido el análisis sísmico de la zona. Para ello se realizó un estudio para la confección del espectro de diseño tomando como base de éste, la acción que cuatro sismos tuvieron sobre Santiago en el pasado.

Palabras clave: Viaducto, impacto ambiental, puentes de dovelas, viga lanzadora, hormigón pos-tensado

Abstract

This paper describes the development of the project designated as Line 4 of the Santiago's subway, which includes the construction of a new railway line with 32.4 kilometers of longitude, consisting of underground, surface and elevated tracks in the city of Santiago, Chile. The design of the viaduct has been based on the intensive use of interlocking prefabricated structures (segmental bridges), with the purpose of minimizing the impact - regarding time and space - that this type of project usually generates on the roadways surrounding its layout. In addition, this project has achieved an architectural design of slender forms and soft and rounded lines, in harmony with the surroundings. The design of the viaduct is characterized by a "U" type superstructure, which is built with interlocking prefabricated segments (segmental bridges). This method is quite usual in developed countries but is applied for the first time on a viaduct in Chile. Another important issue addressed in this project has been the seismic analysis of the area. To perform this study, a design spectrum was created based on four seismic movements that affected Santiago in the past.

Keywords: Viaduct, environmental impact, segmental bridge, launching beam, post-tensioned concrete

1. Introducción

Metro S.A., se encuentra materializando el proyecto de la nueva Línea 4, (Tobalaba, Américo Vespucio, Puente Alto) que contempla la ejecución de 32,4 kilómetros de líneas de metro, con un trazado que incluye tramos en subterráneo, en superficie y elevados. El tramo que se desarrolla entre Américo Vespucio y Puente Alto, corresponde a una vía elevada o viaducto de 7 kilómetros de longitud, que se emplaza el trazado en el bandejón central del eje de Av. Vicuña Mackenna (ver figura 1).

El diseño de esta estructura fue encomendada al consorcio conformado por las firmas SYSTRA de Francia y CADE-IDEPE de Chile, siendo los respectivos jefes de

áreas de estructuras los ingenieros Serge Montens y Antonio González. Uno de los principales desafíos que planteó Metro S.A. a CADE-IDEPE y SYSTRA, que también desarrollaron la ingeniería básica de la totalidad de la nueva línea y posteriormente la ingeniería de detalles del viaducto, fue minimizar el impacto ambiental durante la construcción y la operación, desafío nada de fácil, ya que los carros con que se equipará esta nueva línea son de mayor capacidad, más pesados y anchos que los actuales. Además utilizan ruedas de acero en lugar de ruedas neumáticas.

Para ello se debió analizar y visitar en conjunto con Metro, el tipo de soluciones que se estaban

2. El impacto visual

proyectando a nivel mundial y adaptarlas a las condiciones propias del proyecto. Otro hito importante que debió considerarse, lo constituyó el plazo récord que definió Metro para la construcción y puesta en marcha de esta nueva línea y que en la práctica significó que la construcción de los 7 kilómetros de viaducto debía estar terminada en 8 meses a partir de la fecha en que la fábrica de prefabricados se pusiera en marcha, para lo que a su vez se tenía un plazo de sólo 4 meses.

Para lograr estos objetivos, en el diseño del viaducto se ha considerado el uso intensivo de prefabricados (dovelas), en cuya fabricación y montaje se emplean métodos y equipos de alta tecnología. A su vez, el diseño ha debido recoger altas exigencias funcionales y arquitectónicas, traducidas en formas esbeltas, de trazos suaves, redondeadas y armónicas con el entorno, que dieron origen a un diseño estructural muy exigido.

El diseño adoptado finalmente corresponde a una superestructura de tablero inferior tipo "U", la cual se construye a partir de segmentos prefabricados (dovelas), que se trasladan a posición. Luego se izan mediante el apoyo de grandes vigas lanzadoras, luego se ensamblan y pegan entre sí y posteriormente se postensan mediante cables de acero para constituir una estructura resistente definitiva por donde transitará el tren y sobre la cual también se conforman las seis estaciones que contempla este tramo elevado.

Si bien este tipo de solución de construcción es conocida en países desarrollados, los que disponen de numerosas carreteras construídas mediante esta tecnología, es la primera vez que se emplea en Chile en un viaducto.

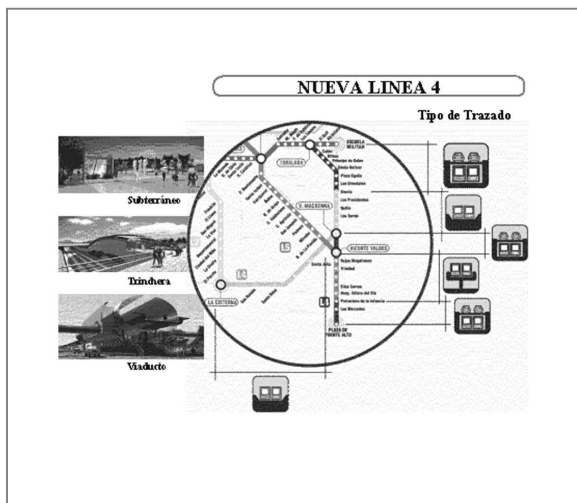


Figura 1. Trazado línea 4

En general, las soluciones empleadas para el diseño de viaductos de hormigón, diferenciados por su superestructura, son de dos tipos: soluciones con tablero superior y soluciones con tablero inferior. Las soluciones con tablero superior son normalmente propias de las estructuras viales y sus superestructuras se pueden clasificar en: vigas prefabricadas de acero doble T, vigas prefabricadas de hormigón y vigas prefabricadas tipo cajón (ver figura 2).

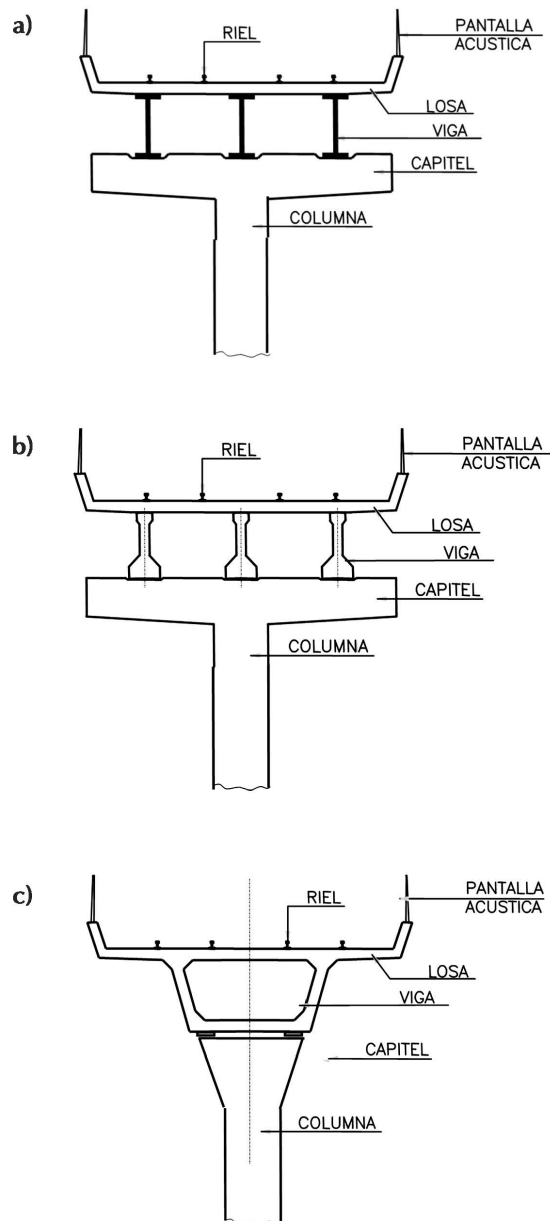


Figura 2. a) Vigas prefabricadas de acero doble, b) Vigas prefabricadas de hormigón y c) Vigas prefabricadas tipo cajón

Esta última solución es la más empleada a nivel mundial, tanto para carreteras como para metro o ferrocarriles, siendo pocas las soluciones materializadas con tablero inferior, las que se limitan a puentes de tipo ferroviario, en tramos de longitud limitada. Las soluciones de tablero inferior se pueden clasificar en sección doble U y sección simple U (ver figura 3).

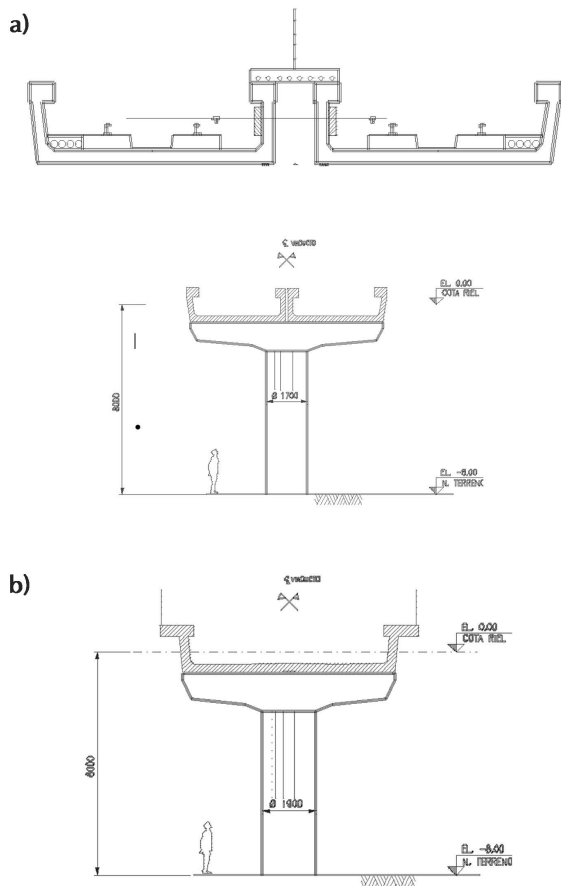


Figura 3. a) Sección doble U y, b) Sección simple U

Por su menor peso unitario, la primera de ellas permitiría incluso pensar en un prefabricado del tramo completo y podría, teóricamente, ser menos impactante al prescindir de barandas laterales. Sin embargo, tiene un grave inconveniente operacional, ya que es necesario cruzar la vía energizada (tercer riel) al llegar a las estaciones y ser éstas de andén lateral, como ocurre en la Línea 4. Por otra parte, el ancho de la solución es bastante mayor, por lo que siempre será menos impactante una sección U.

Una de las grandes diferencias entre ambas soluciones, tablero superior versus la de tablero inferior, es el impacto visual. La superestructura con tablero inferior es menos impactante pues no requieren barreras antiruido adicionales ni rieles de seguridad para un eventual descarrilamiento, aunque en principio son estructuralmente más complejas y de mayor costo relativo (ver figura 4).

Dentro de los conceptos que se analizaron para reducir el impacto final, Systra Cade consideró que el impacto de la superestructura era menor al disminuir su ancho y altura de viga. Además, éste disminuía fuertemente al eliminar las sombras mediante la utilización de formas suaves y continuas, lo que se consideró a nivel de ingeniería de detalles. A lo anterior, se suma el hecho de que si las barandas son livianas, menor es el impacto.

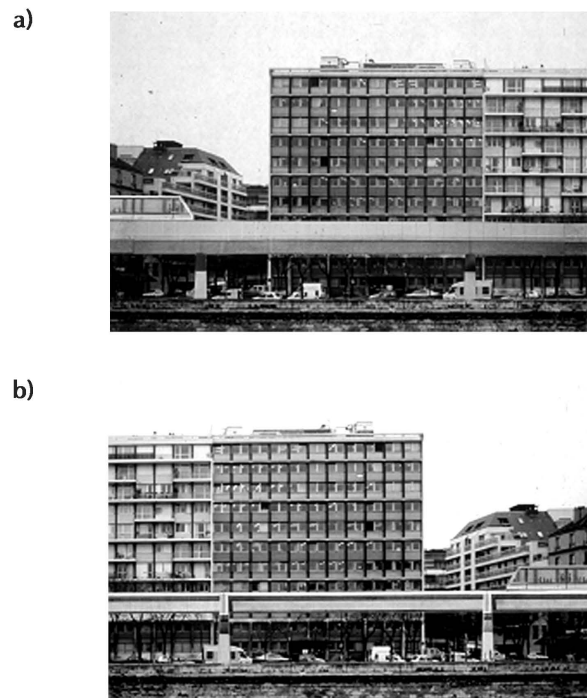


Figura 4. a) Tablero superior. b) Tablero Inferior

Como se puede ver en la Figura 5, también es claro que las columnas con menor sección son las que producen el menor impacto visual. Lo mismo sucede con los capiteles. Por esta razón, se efectuaron cálculos de dimensiones mínimas que, sin embargo, cumplen con las normativas y recomendaciones internacionales para este tipo de estructuras en países sísmicos. La forma

liviana y estilizada de las columnas es muy importante, dado que es el elemento del viaducto que se encuentra a nivel del peatón u observador. Además antes de optar por la solución final, se realizó una comparación entre soluciones de columnas redondas y cuadradas de características resistentes equivalentes.

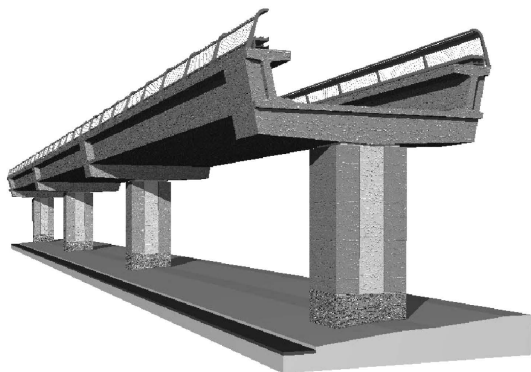


Figura 5. Visualización del impacto de diferentes estructuras

Otros aspectos importantes de destacar son la altura del viaducto, la proporción de la luz de sus tramos y sus dimensiones. Respecto de la altura del viaducto, en la anteriormente construida (línea 5) se había intentado que el viaducto fuera lo más bajo posible, aunque asegurando el gálibo requerido por vialidad, para llegar a costos mínimos.

Al observar las soluciones de viaducto a nivel mundial, se concluyó que cualquiera que fuera la solución empleada, el impacto urbano disminuiría al aumentar la altura de los viaductos. Existen efectos positivos y negativos cuando se sube el nivel del riel:

- Aumenta el costo de las estaciones (marginal)
- Aumenta la altura a remontar por los pasajeros

- Se hacen más expeditas y funcionales las pasarelas de acceso

Por tal razón, la recomendación de Systra Cade fue subir en un metro la altura del viaducto, dado el costo marginal que representa este aumento.

En lo que se refiere a la proporción luz-dimensiones, la separación de las columnas (luz) influye directamente en las dimensiones estructurales del viaducto. Esto significa que a mayor luz, mayor es la sección de las columnas y mayor la altura del tablero del viaducto. Dadas las condiciones de diseño de la Línea 4, el impacto de un viaducto de 35 metros de luz es bastante menor que en uno de 25 metros de luz, mientras que su mayor costo resulta marginal para el proyecto.

3. Reducción del impacto durante la construcción

Este impacto se debe analizar en dos fases de la construcción: en la construcción de la infraestructura y en la de la superestructura.

En el caso de la infraestructura, dadas las características favorables del terreno de Santiago, se recomendó el empleo de fundaciones tipo pila, las que son claramente menos invasivas que las de zapata aislada (ver figura 6).

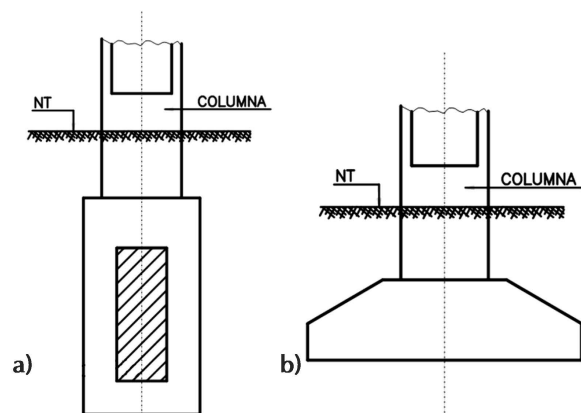


Figura 6. a) Fundaciones tipo pila, b) Fundaciones tipo zapata aislada

Otro punto que en su momento se analizó y finalmente se descartó por el impacto vial que significaba, fue la posibilidad de prefabricar columnas en conjunto con los capiteles, lo que era totalmente factible. A esto

se agrega que las soluciones prefabricadas poseen normalmente mejor calidad en sus terminaciones y más calidad del hormigón.

En lo que a superestructuras se refiere, partiendo de la base que la solución adoptada corresponde a una sección U, se analizó durante el diseño soluciones de vigas prefabricadas con losa en sitio, tramos prefabricados completos y prefabricación de dovelas a ensamblar en terreno. Así, a pesar de su mayor costo directo, se adoptó finalmente la solución de dovelas, por su menor impacto y mejor condición estética.

4. El diseño estructural

Uno de los primeros análisis que se realizó fue el análisis sísmico: Para realizar el análisis de los esfuerzos, desplazamientos y deformaciones que los movimientos sísmicos inducen sobre la infraestructura, se subcontrató un estudio a la firma especializada "S y S Ingenieros Consultores", que, basado en los estudios realizados para el mismo fin de la Línea 5 (Sarrazin y Saragoni, 1996), y considerando las propiedades del terreno de fundación en donde estará emplazado el viaducto (Petrus Ingenieros, 2002), determinó las cargas y otros parámetros sísmicos. El proceso de determinación de las cargas sísmicas comprendió las siguientes actividades de análisis:

- Evaluación del riesgo sísmico del lugar del emplazamiento de la Línea 4.
- Definición de un espectro de diseño para la estructura para dos tipos de sismos: período de retorno de 100 años (sismo extremo) y período de retorno de 50 años (sismo de utilización).
- Generación de registros artificiales de diseño.

Para la confección del espectro de diseño se tomaron como base 4 sismos de acción sobre Santiago (ver tabla 1).

Tabla 1. Sismos de acción sobre Santiago de Chile

Región Epicentro	Distancia epicentral Km	Profundidad focal Km	Magnitud RICHTER	Distancia a Stgo. Km
Valparaíso Papudo	134	60	8,5	120
La Ligua	116	60	7,5	100
Talca Concepción	340	60	8,5	335
Las Melosas	46	10	7,0	45

Los casos con un mayor potencial destructivo para la estructura a diseñar fueron los de Valparaíso-Papudo y Talca-Concepción. El espectro promedio de

aceleraciones absolutas, para un amortiguamiento de 5% y en la condición última para la Línea 4, comparado con el de la Línea 5, aparece en la Figura 7.

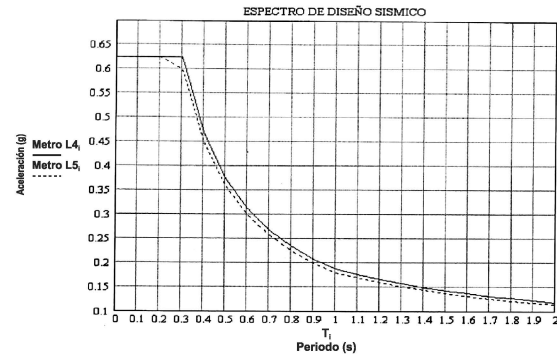


Figura 7. Espectro sísmico

El espectro elástico de diseño queda dado por:

$$\begin{aligned}
 &2,5 A_n \quad T \leq 0,288 \\
 &\frac{1,2 A_v S}{T} \quad 0,288 \leq T \leq 1,0 \text{ seg.} \\
 &\frac{1,2 A_v S}{T^{2/3}} \quad 1,0 < T < 4,0 \text{ seg.}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

con $A_n = 0,25 \text{ g}$ $A_v = 0,15 \text{ seg.}$ $S = 1$

Para la determinación de las solicitaciones sísmicas verticales este espectro de aceleraciones se multiplicó por 2/3.

Se realizó el análisis sísmico transversal de los tramos típicos de longitudes iguales de ínter estaciones y de los tramos particulares siguientes: tramos vecinos de distinta longitud, aparatos de vías, tramos curvos, tramos extremos vecinos a los estribos N y S y tramos de estaciones. Para los mismos tipos de tramos se modeló el efecto del sismo longitudinal, considerando 9 tramos y 4 en el caso de los tramos curvos. Estas modelaciones se efectuaron con el programa ROBOT- Millenium (elementos tipo barras con elementos finitos), considerando las propiedades de: la superestructura, el efecto de los apoyos elastoméricos, las columnas y sus fundaciones y la interacción del suelo-estructura.

Para el cálculo de las solicitaciones sobre las columnas y las fundaciones se empleó el programa RISA 3D, versión 4.5. Se utilizó un factor $R = 1$, de modificación de respuesta para el sismo de servicio. El efecto de los sismos horizontal longitudinal, horizontal transversal y

vertical se evaluaron según el criterio de Newmark (AASHTO División IA pto. 3.9), combinando 100% de cada estado con la suma de 30% de los otros estados. Con estos programas fue posible conocer tanto los esfuerzos inducidos en la estructura como los desplazamientos, sobre todo en los apoyos, los modos de vibrar, los períodos y la influencia del apoyo elastomérico sobre el período.

En cuanto al cálculo de la superestructura, se consideró que cada tramo del viaducto está formado por un tablero de sección U, simplemente apoyado sobre placas elastoméricas, con 6 láminas de acero de $e=3$ mm y de dimensiones para los tramos corrientes de $400 \times 500 \times 90$ mm y para los casos especiales (tramos curvos, aparatos de vías), de dimensiones $450 \times 550 \times 90$ mm. Los tramos están formados por dovelas de tramos (3.500 mm teóricos) y 2 dovelas de columnas en los extremos. Los tramos son ensamblados en terreno por pos-tensado longitudinal de las almas (2 x 3T15) y de las losas de tablero con 12T15, 10T15 y 8T15, dependiendo de la longitud del tramo. El cálculo de la flexión longitudinal de los tramos se realizó considerando:

- Cargas vivas de utilización (1 y 2 trenes)
- Acción de fuerzas de frenado
- Impacto
- Temperatura
- Viento y sismos
- Influencia de cargas de construcción
- Efecto del tiempo en materiales retracción, fluencia, pérdidas de pos-tensado, efecto del pos-tensado y deformaciones.

Se efectuó con el programa "ST1", basado en el método de los desplazamientos, utilizando elementos tipo barras. A modo de comparación, también se efectuó un análisis con el programa SAP-2000, versión 8.2.6.

Para el cálculo transversal de la superestructura, se efectuó el cálculo de los esfuerzos inducidos por el paso de dos trenes, en la posición de solicitaciones máximas, modelando el tramo por elementos tipo placas con el programa ANSYS (de SYSTRA). Este programa de elementos finitos, incluye la acción de los cables de pos-tensado longitudinales y los transversales (2 x T19) de las dovelas de columna, lo que permitió el armado transversal de las dovelas.

El cálculo de la interacción riel-estructura se realizó considerando que los rieles son continuos en la longitud del viaducto y van anclados elásticamente con clips sobre apoyos elastoméricos. Los esfuerzos y

desplazamientos relativos generados por la operación de los trenes y por la acción de la temperatura y los que éstos inducen sobre la infraestructura, fueron analizados con el programa CWRBIA, que permite determinar las acciones de deformaciones no lineales y tensiones en el riel.

Los capiteles de ínter estación y estaciones que van sobre las columnas y que reciben durante la operación las descargas de los tramos y las de los apoyos de las vigas lanzadoras durante el montaje, fueron modelados como elementos "sólidos" de 3D, haciendo uso de:

- SAP 2000, versión 8.2.6
- I-DEAS versión 9

Alternativamente se estudió el estado final utilizando el Método de Bielas y Tirantes (ACHE-ATEP, 2003). Estos métodos permitieron conocer el estado tensional, la distribución de compresiones y así determinar la posición más adecuada de las armaduras para tracciones y esfuerzos cortantes.

Para conocer el efecto del impacto de las cargas de los trenes, determinar los coeficientes de impacto y las vibraciones que influyen en el confort de los pasajeros, se emplearon los programas ANSYS y el programa PACT (de SNCF, Ferrocarriles Franceses).

Como comentario general, es interesante destacar que dadas las exigencias arquitectónicas y de esbeltez definidas con el fin de disminuir el impacto ambiental, la mayor parte de los elementos resultaron con cuantías altas en las armaduras de refuerzo. Como sea, siempre dentro de los límites permitidos por las normas y recomendaciones de diseño pertinentes.

5. El sistema de prefabricado

5.1 Planta de prefabricado

El proceso de fabricación de dovelas en planta constituye la actividad más compleja y crítica del proyecto. Esto, debido a la interdependencia entre el programa de prefabricado y de montaje, así como la precisión dimensional de segmentos a ensamblar en terreno. La producción de las 2.211 dovelas y el posterior ensamble de éstas en terreno, requirió de una planta de prefabricado constituida por 6 bancos de prefabricación de dovelas tipo y 3 bancos de dovelas de columna (ver figura 8).

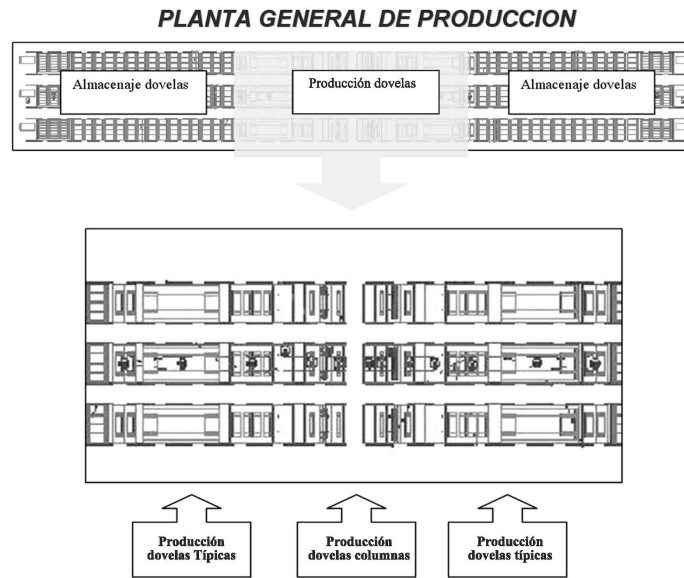


Figura 8. Producción de las dovelas

De acuerdo al diagrama esquemático (ver figura 9), el proceso se inicia con el armado de la enfierradura de las dovelas, el cual es trasladado al banco de hormigonado, lugar en el cual se completa la colocación de insertos y ductos de pos-tensado y se realiza el ajuste fino de acuerdo al control geométrico (medidas reales de terreno, retracción de hormigón y acortamiento por efecto del pos-tensado). Posteriormente se ajustan los moldajes metálicos que dan la forma y las dimensiones definitivas.

Las dovelas se construyen utilizando como moldaje la dovela anterior (caras conjugadas), de manera de asegurar posteriormente el ajuste perfecto cuando se vuelvan a unir las dovelas en el proceso de montaje en la viga lanzadora.

5.2 Montaje de las Dovelas

Las dovelas fabricadas en la planta, se trasladan mediante camiones hasta cada frente de trabajo. Para el montaje de estas dovelas se utiliza una maquinaria denominada viga lanzadora, que cumple la función de estructura de soporte durante el armado de cada tramo y posteriormente se auto-desplaza por sobre las columnas del viaducto, para permitir el armado de los tramos sucesivos.

En el frente de trabajo, las dovelas son elevadas con un huinche incorporado en la viga lanzadora hasta una determinada altura por sobre el nivel del capitel de las columnas, en donde se cuelgan mediante barras de acero de la estructura de la viga (ver figura 10). Al mismo tiempo se hace una nivelación horizontal y vertical de las dovelas hasta la completa transferencia de la carga a la estructura soportante, liberando de ese modo el huinche para que éste pueda iniciar el proceso de izado de una nueva dovela, el ciclo se repite hasta completar el total de dovelas que requiere el tramo, que en el caso típico (vano de 35m), es de 2 dovelas de columna (una en cada extremo) y 9 dovelas de tramo.

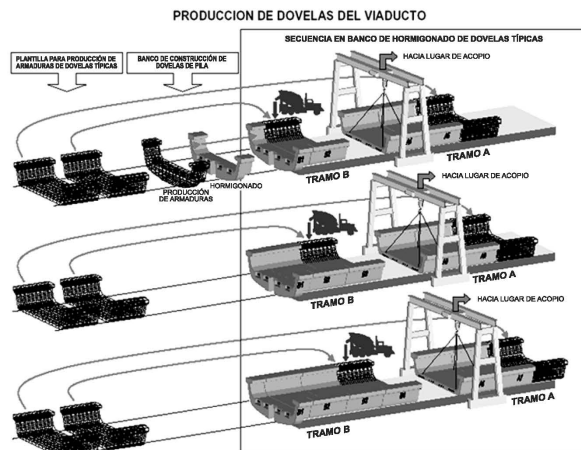


Figura 9. Sistema de producción de dovelas del viaducto

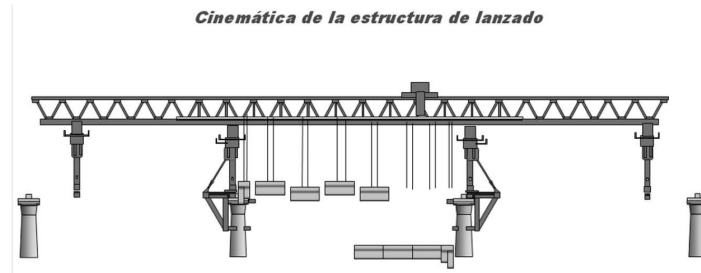


Figura 10. Cinemática de la estructura de lanzado e izado de dovelas

Para poder realizar un perfecto contacto entre las cara de las superficies conjugadas de dos dovelas consecutivas se considera la aplicación de adhesivos epóxicos cuya finalidad es servir como lubricante para el posicionado, impermeabilizante de la junta y protector de los sistemas de pos-tensado. Para asegurar este contacto

se aplica una compresión uniforme mediante la utilización cables temporales. Estos cables se tensan hasta dar una carga total de aproximadamente 110 tons. Este proceso se repite entre cada una de las dovelas hasta completar la totalidad en el vano. (ver figura 11)

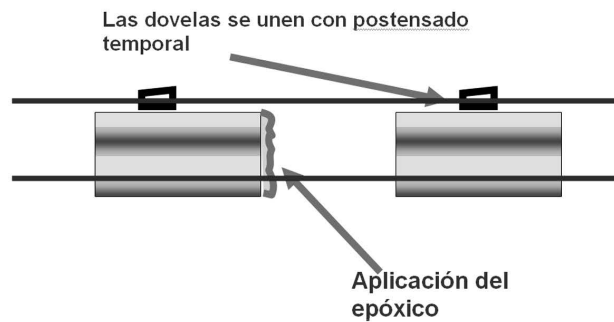


Figura 11. Aplicación de adhesivo epóxico a dovelas

Se procede a continuación al enhebrado de los cables de pos-tensado. En cada ducto se colocan 12 cables en los tramos normales de 35m; la dovela tiene 18 ductos, es decir, en total se colocan 216 cables equivalentes a 7,7 kilómetros en cada tramo (aproximadamente 1.500 kilómetros en todo el viaducto). Mediante una secuencia perfectamente controlada se van tensando los cables por grupos de ductos

(aproximadamente 230 ton para cada grupo de cables en un ducto, lo que da un total aproximado de 3800 ton de compresión por tramo). A continuación del tensado se baja el sistema de soportación de dovelas de modo de transferir la carga desde la viga lanzadora a las columnas del tramo y proceder a la liberación de la viga de montaje para su traslado al vano siguiente (ver figura 12).

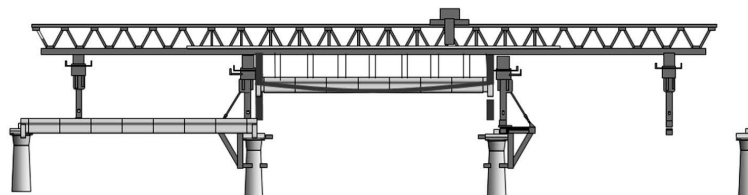


Figura 12. Postensado de cables

6. Obras asociadas al viaducto

Las estaciones son por su envergadura zonas del viaducto de alto impacto tanto durante la construcción como en forma definitiva. Es por esto que, para mitigar este efecto negativo y dado los restrictivos plazos del proyecto, se dispuso que:

- La construcción de los andenes y la zona de mesanina se construyeran a partir del viaducto construído y no como una estructura independiente y masiva.

- La solución arquitectónica y estructural fuera liviana, transparente y para permitir la continuidad de los jardines del bandejón central y las posibles ciclo-vías o paseos.
- A modo de conclusión, Cade-Idepe consideró que las estaciones deberían ser construídas “alrededor” del viaducto (ver figura 13).

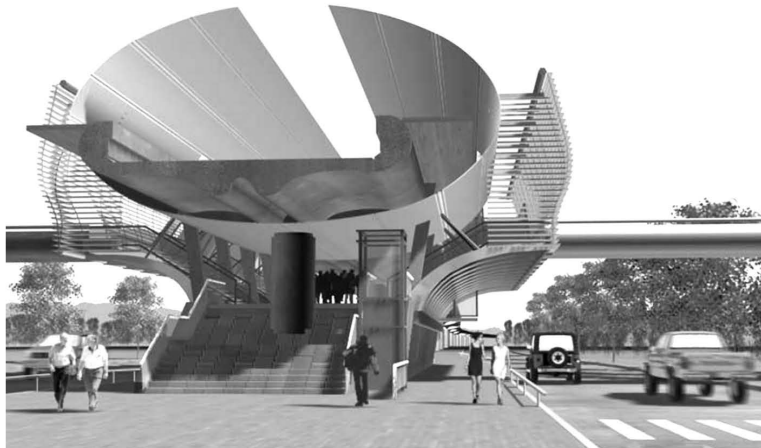


Figura 13. Maqueta de vista posterior de estación

7. Agradecimientos

Agradecemos muy particularmente a METRO S.A., que siempre haya impulsado el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías en sus proyectos y que, en este caso, depositó su confianza en nuestras empresas

para ayudarlos a desarrollar el diseño de esta obra, autorizando a su vez la publicación de este artículo.

8. Referencias

- AASHTO (1996)**, Standard Specifications for Highway Bridges, Capitulo 8, 9 y 14. 16ª Edición. Washington D.C., Estados Unidos.
- ACHE-ATEP (2003)**, Asociación Española de Hormigón Estructural. "Método de Bielas y Tirantes", Monografía M6. enero, Madrid, España.
- CALTRANS (1994)**, "Bridge Design Specification Manual". Sec. 8, 9 y 14m agosto. State of California, Estados Unidos.
- Petrus Ingenieros (2002)**, "Bases de Diseño de Pilas de Fundación Sector Elevado L4 del Metro, Santiago, Chile.
- Sarrazin M., Saragoni R. (1996)**, "Asismicidad en el metro en Altura". Revista Ingenieros, del Colegio de Ingenieros de Chile pág. 11-12, abril.

