

Calzadas flotantes de Chapultepec y de Chivatito en Ciudad de México

Chapultepec and Chivatito Footbridges in Mexico City

Jesús José CORBAL ÁLVAREZ^a, José Antonio GONZÁLEZ MEIJIDE^b, Adrián PÉREZ CARBALLO^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en TEMHA S.L. Professional Engineer (Texas/California). corbal@temha.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en TEMHA S.L. Profesor Asociado Universidade de A Coruña. mejide@temha.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en TEMHA S.L. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado.

RESUMEN

El Bosque de Chapultepec, ubicado en Ciudad de México, es uno de los parques urbanos más grandes del mundo. Las calzadas flotantes de Chapultepec y de Chivatito son dos pasarelas que tienen como objetivo mejorar la permeabilidad peatonal y ciclista entre ambos márgenes del Anillo Periférico, permitiendo así mitigar el efecto barrera que esta autopista urbana ejerce entre distintas secciones del bosque. Ambas estructuras se han planteado con idéntico enfoque conceptual, combinando la integración estética con el respeto por el entorno, disponiéndose pilas arborescentes y una serie de óculos que permiten la máxima integración de los árboles en la plataforma.

ABSTRACT

The “Bosque de Chapultepec” (Chapultepec Forest), placed in Mexico City, is one of the largest urban parks in the world. The Chapultepec and Chivatito “calzadas flotantes” (floating walkways) are two footbridges that aim to improve pedestrian and bicycle permeability between both sides of the “Anillo Periférico”, thus mitigating the barrier effect that this urban highway exerts between different sections of the forest. Both structures have been designed with identical conceptual approach, combining aesthetic integration with respect for the environment, with tree-shaped piles and a series of oculi that allow for maximum integration of the trees into the platform.

PALABRAS CLAVE: pasarela peatonal, acero, cálculo sísmico, interacción ingeniería-arquitectura.

KEYWORDS: footbridge, steel, seismic design, engineering-architecture interaction.

1. Introducción

El Bosque de Chapultepec, considerado el pulmón de Ciudad de México, es uno de los parques urbanos más grandes del mundo. Las calzadas flotantes de Chapultepec y de Chivatito son dos pasarelas que tienen como objetivo mejorar la permeabilidad peatonal y ciclista entre ambos márgenes del Anillo

Periférico, permitiendo así mitigar el efecto barrera que esta autopista urbana ejerce entre distintas secciones del mencionado bosque.

Ambas estructuras se han planteado con idéntico enfoque conceptual, combinando la integración estética con el respeto por el entorno, disponiéndose pilas arborescentes y

una serie de óculos que permiten la máxima integración de los árboles en la plataforma.



Figura 1. Óculo para la preservación de árboles.

El diseño y construcción de las pasarelas se enmarca en el contexto del proyecto “Chapultepec: Naturaleza y Cultura”, una importante propuesta que durante los últimos años ha logrado impulsar una significativa reestructuración de diversos espacios públicos y culturales en la Ciudad de México.

2. Descripción de las estructuras

2.1 Definición de la superestructura

La continuidad de los recorridos peatonales se logra mediante desarrollos de 436 m (Chapultepec) y de 774 m (Chivatito), con anchura de tablero mínima de 9 m (sin óculo) y máxima de 17 m (con óculo).



Figura 2. Pasarelas de Chivatito (norte) y Chapultepec (sur).

Estructuralmente, ambas pasarelas están resueltas con esquema tipo pórtico multivano, con pilas metálicas de geometría arborescente, de tres o cuatro brazos, que se empotran en tableros mixtos acero-hormigón.

La longitud de los vanos tipo es de 17 m y el tablero se resuelve mediante tres vigas cajón longitudinales que reciben el empotramiento de los brazos de pilas (brazos transversales conectan con vigas laterales y brazos longitudinales y verticales conectan con la viga central). Las vigas principales se conectan entre sí mediante riostras, también metálicas, que soportan una losa de hormigón.

En los tramos con óculo, la viga central se divide en dos vigas que también tienen continuidad con las vigas laterales de la sección tipo sin óculo, por estar en la misma alineación longitudinal que ellas. En estas zonas de transición, la pila también se materializa como un pórtico transversal, pues se recurre a la disposición de dos fustes, teniendo cada uno de ellos idéntico planteamiento geométrico al del fuste único empleado en las secciones tipo que carecen de óculo.

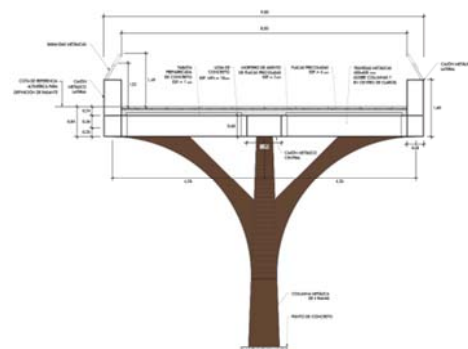


Figura 3. Sección tipo sin óculo.

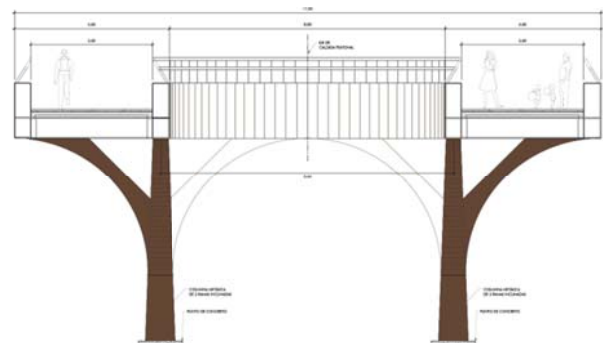


Figura 4. Sección tipo con óculo.

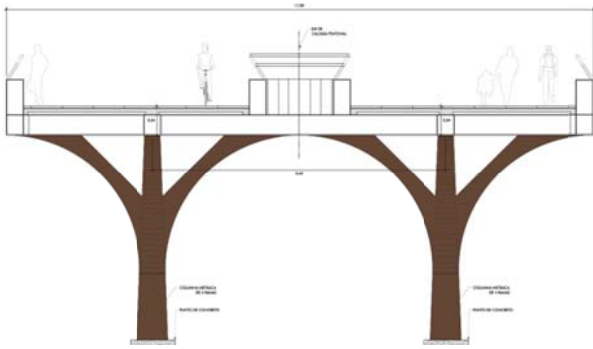


Figura 5. Sección de transición a óculo.



Figura 6. Transición de sección tipo a óculo.

2.2 Definición de la subestructura

La altura de las pilas de acero es variable entre 2.30 m y 11.30 m. Para el desarrollo completo de los brazos de las pilas desde su empotramiento en el tablero hasta su integración en un fuste único se requiere una altura mínima de 4.00 m, motivo por el que las pilas de menor envergadura se han planteado truncadas a la altura correspondiente. De este modo se logra mantener la armonía del conjunto de brazos de soporte, aparentando determinadas pilas estar semienterradas.



Figura 7. Tramo con pilas altas.



Figura 8. Tramo con pilas bajas.

Las pilas arrancan de plintos de hormigón sobre encepados de uno, dos o cuatro pilotes. La cimentación es de tipo profundo para las pilas y directa para los estribos.

2.3 Accesos a las pasarelas

La pasarela de Chivatito cuenta con acceso desde un tercer estribo gracias a una bifurcación planteada en su extremo occidental. Además, dispone de un cuarto acceso a través de una escalera helicoidal integrada en un óculo.



Figura 9. Escalera helicoidal en óculo de Chivatito.



Figura 10. Bifurcación de tablero de Chivatito.

3. Condicionantes del proyecto

Existen condicionantes significativos para el diseño de las pasarelas como, por ejemplo, la integración de las mismas dentro del plan maestro para rehabilitar el bosque o las importantes restricciones geométricas.

En cuanto a la definición estructural, se ha dado respuesta al conjunto de condicionantes externos, satisfaciendo las necesidades de integración estética y geométrica. Al mismo tiempo el diseño está sujeto a la complejidad del entorno desde un punto de vista técnico, especialmente debido a las singularidades sísmicas y geotécnicas.

3.1 Condicionantes de carácter estético

La necesidad de las pasarelas de Chapultepec y de Chivatito deriva del ambicioso plan elaborado para revitalizar el bosque urbano de Chapultepec. Es por ello que el enfoque geométrico y estético de las pasarelas debe estar integrado dentro del contexto general de las actuaciones llevadas a cabo para lograr un impulso cultural global y altamente respetuoso con el patrimonio natural.

Derivado del papel tractor que la protección e impulso del patrimonio cultural ejerce dentro del proyecto “Chapultepec: Naturaleza y Cultura”, estas pasarelas no se conciben simplemente como una solución a problemas preexistentes de la movilidad urbana, sino que nacen planteadas desde la concepción del propio plan como una especie de esculturas que buscan integrarse en el entorno, a la par que pretenden transmitir una sensación de dinamismo.

Así, las geometrías circulares adoptan el papel protagonista a todas las escalas, siendo éste un condicionante fundamental al que adaptar el esquema estructural. Los arcos de circunferencia están presentes en los brazos de las pilas, logrando una elegante transición entre fustes y tablero. Es en esta transición donde resultan fácilmente diferenciables ambas

pasarelas, pues únicamente la de Chapultepec respeta la transición en tangencia prevista en diseño, habiendo desaparecido el detalle para la de Chivatito durante la fase de construcción.



Figura 11. Encuentro pila-tablero (Chapultepec).



Figura 12. Encuentro pila-tablero (Chivatito).

En la geometría del tablero destaca la recurrencia de los círculos para la definición de los óculos y para la transición de sección tipo a sección con óculo. La directriz del trazado en planta del tablero también consiste en curvas circulares enlazadas con las que se consigue que las pasarelas serpenteen a través del bosque adaptándose a los condicionantes impuestos tanto por el viario preexistente como por la propia flora, respecto a la que se busca minimizar la afección y maximizar la integración.

En lo que respecta a acabados, las formas circulares también están presentes en detalles como las barandillas o el acabado de los pavimentos.



Figura 13. Patrones circulares en pavimento y trazado adaptado a árboles existentes.

El acceso intermedio definido para la pasarela de Chivatito está planteado como escalera helicoidal integrada en unos de los óculos, por coherencia con las geometrías circulares del conjunto.

3.2 Integración con la naturaleza

La protección y rehabilitación del patrimonio natural es otra de las máximas del plan maestro.

Por ello, el encaje geométrico de las pasarelas se realiza partiendo de un inventario de las especies arbóreas y arbustivas existentes en las diferentes secciones del bosque. Con ello se consigue lograr la configuración y el trazado más respetuoso con el entorno y la flora.

El trazado en planta busca la mínima afección, al adaptarse a las zonas de menor densidad arbórea. La disposición de óculos permite la máxima versatilidad a la hora de lograr la adaptación, contribuyendo a minimizar la tala de los árboles de mayor porte.

El trazado en alzado busca la máxima integración con el entorno y en especial con las especies arbóreas. En este caso también resultan fundamentales los óculos, pues a través de ellos emergen las copas de los árboles. Por ello, para las zonas en que las especies arbóreas tienen menor altura, también se busca que la rasante no se eleve demasiado sobre el terreno.

El reparto de vanos y la posición de las pilas también están reflexionados para una

mínima afección al patrimonio natural durante las obras, en especial durante la ejecución de las cimentaciones.



Figura 14. Óculo para la preservación de árboles.

3.3 Gálibos verticales

Uno de los condicionantes del trazado en alzado es la ya mencionada integración del itinerario entre las copas de los árboles. Por otra parte, ambas pasarelas cruzan sobre una serie de calzadas e itinerarios peatonales que imponen sus correspondientes restricciones en cuanto a gálibos mínimos a respetar.

El condicionante más restrictivo se produce en el cruce con el Anillo Periférico, una autopista urbana que atraviesa el bosque de Chapultepec con dos niveles de plataforma.

Por tanto, las pasarelas cruzan la autopista respetando, bajo las mismas, un gálibo suficiente para los vehículos que circulan sobre las calzadas a nivel de terreno y, sobre las mismas, un gálibo suficiente respecto al viaducto superior de Anillo Periférico para uso de la ruta peatonal y ciclista.



Figura 15. Cruce entre los dos niveles de Periférico.



Figura 16. Paso bajo el viaducto de Periférico.

En determinadas secciones resulta necesario plantear una depresión de la cota de las calzadas existentes para paliar la problemática de escasez de gálibo vertical, a definir en proyecto independiente.

Gracias al planteamiento de depresión de rasantes y también a la supresión o retranqueo de itinerarios vehiculares, así como el análisis de los gálibos de estructuras rígidas existentes sobre los itinerarios de acceso a las pasarelas, no ha resultado necesario el análisis de acciones de impacto contra el tablero.

3.4 Acciones sísmicas

Para el diseño frente a sismo de las pasarelas se emplean las Normas Técnicas Complementarias del año 2020 de la Ciudad de México, en su apartado de Diseño por Sismo (NTC-S).

La zonificación sísmica y los parámetros sísmicos correspondientes se toman a partir del sistema informático de la Ciudad de México denominado “Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño” (SASID) para las coordenadas de cada estructura. Dada la proximidad entre las dos estructuras, se opta por uniformizar criterios de diseño y se adopta en ambos casos el espectro más conservador.

Las elevadas aceleraciones sísmicas de Ciudad de México deben ser resistidas por unas estructuras que presentan un claro esquema de péndulo invertido, con pilas de geometría arborescentes de fuste único empotradas en su

extremo superior en unos tableros de elevada masa, incrementada por un pavimento consistente en adoquines asentados sobre mortero.

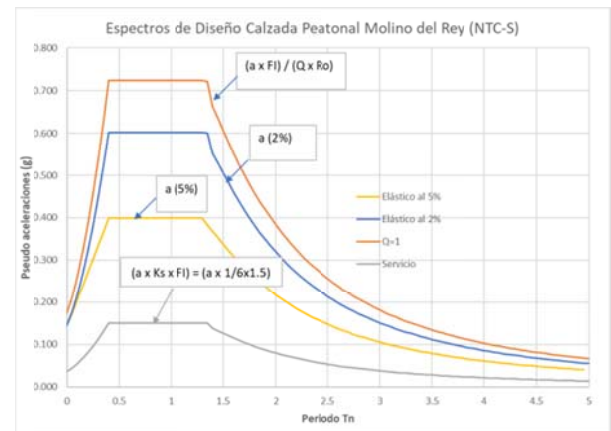


Figura 17. Espectro elástico, de diseño y de servicio.

3.5 Singularidades geotécnicas

Desde el punto de vista geotécnico, existen suelos coluviales, suelos volcánicos arenosos y suelos volcánicos limosos.

En concreto, destaca la presencia de un estrato conocido como “arenas azules” en el entorno de las pasarelas. Se trata de un estrato próximo a la superficie que en el pasado fue objeto de explotación minera, por lo que en las zonas donde este presenta mayor potencia se pueden interceptar cavidades y antiguas galerías, con importantes repercusiones sobre la ejecución de las cimentaciones profundas.

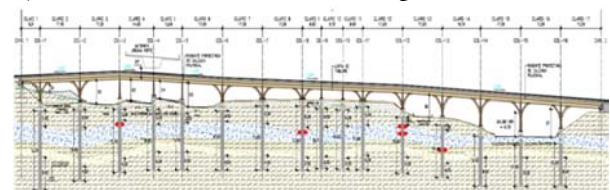


Figura 18. Estratigrafía pasarela de Chapultepec.



Figura 19. Estratigrafía de la zona durante las antiguas obras de depresión del Anillo Periférico.

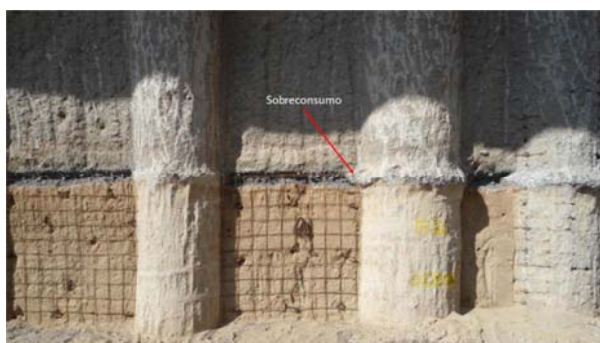


Figura 20. Sobreconsumos de hormigón observados bajo las arenas azules en antiguas obras.

La problemática de la estratigrafía afecta desde un punto operativo en fase de construcción, por las mayores dificultades a la hora de lograr un correcto hormigonado de los pilotes.

Por otra parte, la posible existencia de galerías y oquedades implica una merma en el confinamiento perimetral de los pilotes. Esto tiene una repercusión muy significativa a la hora de evaluar el comportamiento de la estructura frente a las acciones sísmicas horizontales, lo que deriva en variaciones en los esfuerzos internos de los pilotes y una mayor deformabilidad de la estructura ante un evento sísmico.

La posibilidad de existencia de galerías resulta especialmente gravosa para aquellas secciones que en otro caso pudieran ser resueltas mediante un esquema simple de pila-pilote, obligando a la disposición de parejas y grupos de pilotes para lograr una mayor rigidez y una mayor eficiencia estructural a la hora de resistir acciones horizontales.

4. Cuestiones adicionales del diseño

4.1 Tramificación de los tableros

El tablero de ambas pasarelas es continuo y está empotrado en las pilas logrando un esquema tipo pórtico multivano.

Se disponen juntas de dilatación intermedias por lo que, desde el punto de vista

estructural, ambas pasarelas están constituidas por una serie de tramos independientes entre sí.

El posicionamiento de las juntas de dilatación es en este caso un criterio de diseño adicional, del que derivan una serie de condicionantes. Por una parte, las juntas no se pueden plantear en la sección de pila, sino entre dos pilas muy próximas entre sí, para minimizar los voladizos resultantes. Por otra parte, las juntas se disponen por simplicidad fuera de las secciones de óculo, por lo que las zonas con necesidad de integración de árboles restringen las posibilidades de disposición de junta de dilatación. Por último, por rigidez de la subestructura también se presentan zonas en las que la disposición de junta resulta más delicada, pues los movimientos relativos entre tramos adyacentes resultarían de mucha entidad durante la actuación de un sismo.

Para la pasarela de Chivatito el diseño ha considerado dos fases (Fase 1: con 2 estribos; Fase 2: con 3 estribos) para permitir la adición de un futuro ramal. Durante la fase de construcción se ha procedido a la ejecución directa de Fase 2, pero con un acortamiento del ramal correspondiente al tercer estribo.

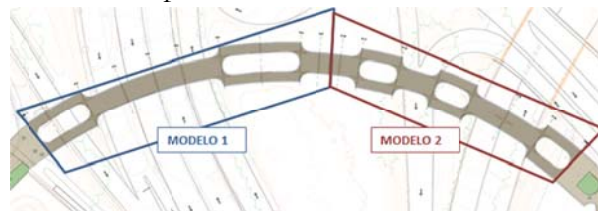


Figura 21. Tramificación de pasarela Chapultepec.

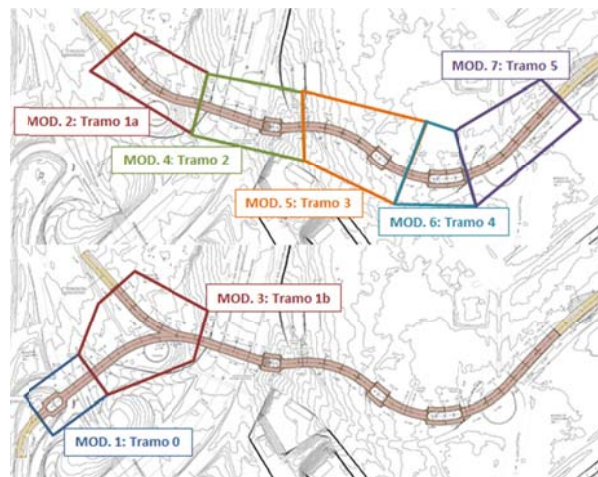


Figura 22. Tramificación de pasarela Chivatito.

4.2 Modelización de la estructura

Los modelos de cálculo planteados son independientes, habiéndose realizado uno para cada tramo de cada pasarela.

Todos ellos incluyen la modelización completa de la subestructura, con los correspondientes muelles para representar debidamente la interacción suelo-estructura en los pilotes según la estratigrafía y los condicionantes geotécnicos.

En los modelos están aplicadas las acciones y combinaciones que permiten obtener los esfuerzos internos y estado tensional de los diferentes elementos, a partir de los cuales se procede al diseño de la estructura.

Los casos de carga sísmicos están planteados sobre los propios modelos por medio de análisis de tipo espectral multimodal.

Destaca la importante masa del tablero, que redundo en importantes esfuerzos para la subestructura. El hecho de haber planteado una losa de hormigón para soporte del pavimento proporciona un efecto diafragma al tablero ante las acciones horizontales, lo que uniformiza las deformaciones y también contribuye a evitar concentraciones de esfuerzos indeseadas.

Para contribuir a uniformizar los desplazamientos del tablero durante el sismo y que los vanos extremos no actúen como un voladizo desde la última alineación de pilas (lo que provocaría importantes torsiones a la subestructura), los estribos disponen de topes transversales. Estos topes se disponen permitiendo un movimiento máximo ajustado en el modelo de cálculo de tal forma que los desplazamientos en la sección de riostra estén en el mismo rango que los desplazamientos que de forma natural se produzcan en las secciones de pila próximas por la rigidez correspondiente a la subestructura.

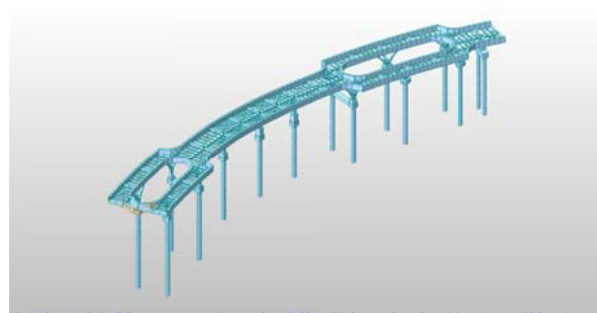


Figura 23. Modelo 1 Chapultepec.

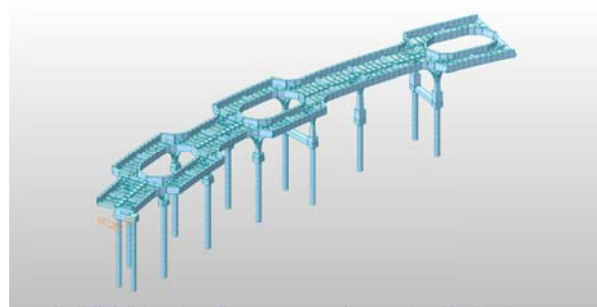


Figura 24. Modelo 2 Chapultepec.

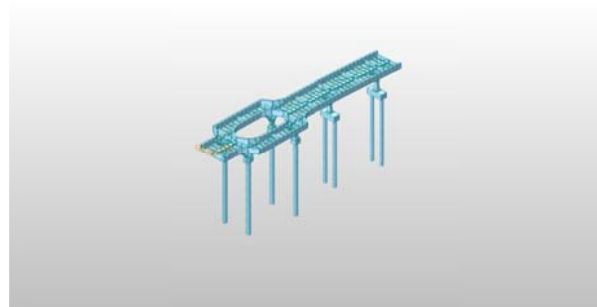


Figura 25. Modelo Tramo 0 Chivatito.

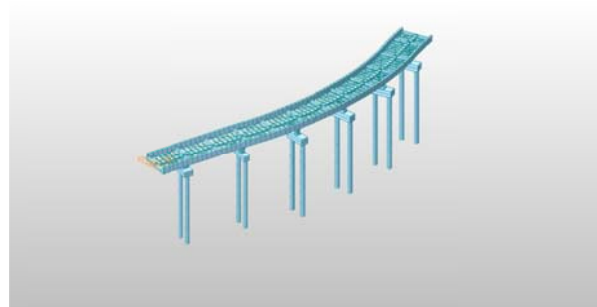


Figura 26. Modelo Tramo 1a Chivatito.

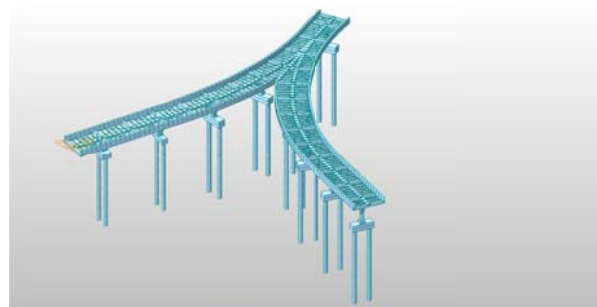


Figura 27. Modelo Tramo 1b Chivatito.

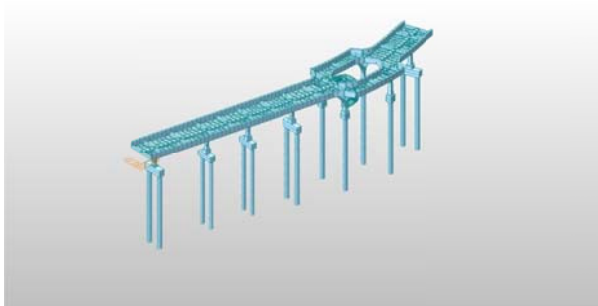


Figura 28. Modelo Tramo 2 Chivatito.

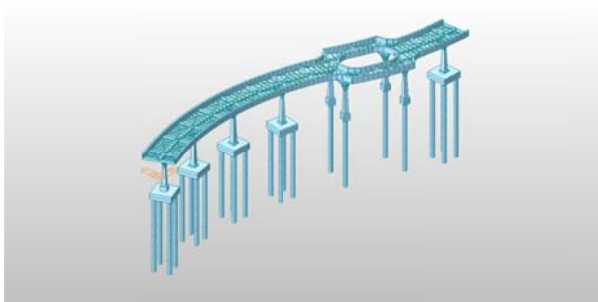


Figura 29. Modelo Tramo 3 Chivatito.



Figura 30. Modelo Tramo 4 Chivatito.

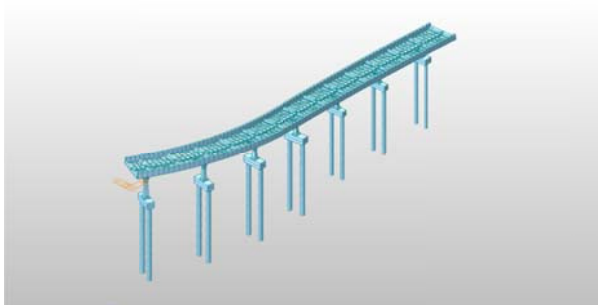


Figura 31. Modelo Tramo 5 Chivatito.

4.3 Escalera helicoidal

El modelo estructural de la escalera helicoidal está integrado dentro del modelo general correspondiente al tramo 2 de Chivatito.

La configuración es de pila-pilote con la cabeza de la pila empotrada al tablero. Para lograr la conexión al tablero, la viga longitudinal

central del mismo se prolonga hacia el óculo, hasta interceptar la cabeza de la pila de escalera.

De la pila de escalera nacen una serie de ménsulas, que dan soporte a los sucesivos descansillos de la escalera, produciéndose una rotación respecto al eje vertical de 120° entre ménsulas sucesivas.



Figura 32. Vista general de la escalera.

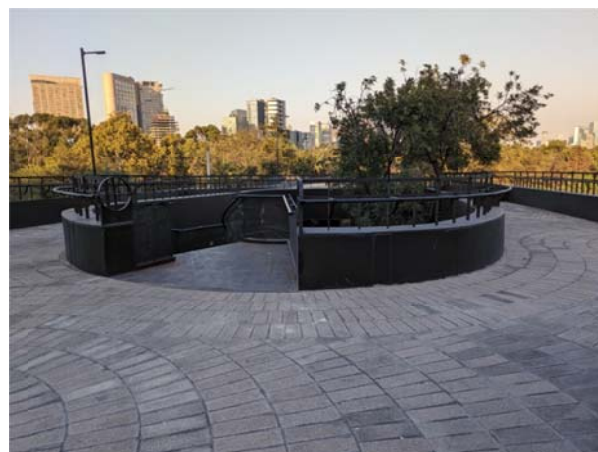


Figura 33. Acceso a escalera desde plataforma.



Figura 34. Escalera helicoidal integrada en óculo.

5. Conclusiones

Tras el diseño y construcción de las pasarelas de Chapultepec y Chivatito se encuentra una ambiciosa propuesta encaminada a revitalizar, potenciar y reconectar un enclave fundamental.

La apuesta por puentes peatonales de esta entidad, con desarrollos amplios y sin recurrir a pendientes ni secciones estrictas, es clave para fomentar una movilidad sostenible, así como para facilitar el ocio de la ciudadanía.

Las secciones transversales generosas contribuyen, junto con los factores previamente mencionados, a la integración de las pasarelas y a que estas sean percibidas por los usuarios como elementos funcionales y cómodos en cuanto a su uso.

Por una parte, destaca la inexistencia de cambios de pendiente bruscos, tanto en tablero como en accesos, así como la planta sinusoidal y la anchura del tablero. Por otra, resalta la integración eficaz con el bosque gracias a un adecuado trazado y a la disposición de óculos.

Todo ello produce una sinergia para que estos itinerarios tengan una mejor percepción y se potencie significativamente su utilización respecto a pasarelas planteadas con un enfoque funcional estricto, como las ya preexistentes en la zona.

Agradecimientos

El diseño y proyecto de las dos pasarelas de Chapultepec y de Chivatito fue realizada entre 2021 y 2022 por la empresa TEMHA SL. La coordinación de los proyectos fue realizada por las consultoras Proyeco y GOC. La coordinación estética del conjunto de actuaciones de “Chapultepec: Naturaleza y Cultura” fue realizada por el artista Gabriel Orozco

La construcción de la Calzada Flotante de Chapultepec se completó en enero de 2023, mientras que la de la Calzada de Chivatito se completó en enero de 2024, siendo el contratista principal el Grupo Indi.

La administración responsable es la *Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno de la Ciudad de México*.



Figura 35. Cartel de carrera organizada con motivo de la inauguración de la pasarela de Chapultepec.