

Estudio Simplificado de Diseño de Viga de Monorriel de Concreto Reforzado: Primer Sistema de Transporte de este Tipo en Panamá 2020

*Simplified Design Study of a Reinforced Concrete Monorail Girder: First
Transportation System of its Kind in Panama 2020*

Isaac Abdiel Salazar Moreno

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá

isaac.salazar@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0003-6382-4883>

Recibido: 9/10/2025 Aceptado: 31/10/2025



DOI <https://doi.org/10.48204/reicit.v5n2.8066>

RESUMEN

El desarrollo urbano en Panamá enfrenta desafíos asociados al crecimiento poblacional, la congestión vehicular y las limitaciones geográficas de una topografía irregular es una realidad. Frente a este escenario, la implementación del primer sistema de monorriel en el país, en el marco de la Línea 3 del Metro de Panamá, constituye un hito histórico en la infraestructura de transporte masivo. Este estudio presenta un análisis simplificado del diseño de la viga de rodaje de concreto reforzado utilizada en monorrieles tipo straddle, tomando como base la experiencia del autor, reglamentos internacionales, Investigaciones entre 2018-2024 utilizadas en otros países referente a monorriel y las especificaciones internacionales AASHTO LRFD (2011, 2017). El trabajo integra conceptos teóricos y experimentales derivados de investigaciones recientes sobre vigas pretensadas, vigas reforzadas, comportamiento dinámico tren-puente, fatiga estructural y criterios de confort de los usuarios, puntos importantes según los artículos desarrollados por Pu (2018) y Zhang y Wang (2024). El objetivo principal es exponer una metodología de diseño simplificada que, sin reemplazar los análisis detallados, permita comprender los parámetros fundamentales de seguridad, durabilidad y eficiencia de las vigas de concreto reforzado para monorrieles en contextos latinoamericanos y en especial en nuestro querido Panamá. Los resultados evidencian

que la aplicación de criterios simplificados de cargas, propiedades de los materiales, proporciona la base clara para la enseñanza de ingeniería civil, ingeniería en edificaciones e infraestructura, en un entorno de recursos limitados. Asimismo, se subraya la importancia de considerar aspectos ambientales, como el impacto acústico y la sostenibilidad del concreto pretensado, en la vida útil de 100 años prevista para la infraestructura. Se concluye que el modelo simplificado propuesto resulta didáctico y aplicable en el ámbito académico, además de constituir una herramienta preliminar de validación para proyectos similares en la región. Finalmente, se destacan futuras líneas de investigación: pruebas dinámicas in situ, optimización del pretensado y monitoreo estructural mediante sensores.

PALABRAS CLAVE: Monorriel, Viga de Rodaje, Diseño simplificado, Concreto Pretensado, Durabilidad

ABSTRACT

Urban development in Panama faces challenges associated with population growth, traffic congestion, and the geographical limitations of an irregular topography. Against this backdrop, the implementation of the country's first monorail system, as part of Line 3 of the Panama Metro, constitutes a historic milestone in mass transit infrastructure. This study presents a simplified analysis of the design of the reinforced concrete running beam used in straddle monorails, based on the author's experience, international regulations, research conducted between 2018 and 2024 in other countries regarding monorails, and the international AASHTO LRFD specifications (2011, 2017). The work integrates theoretical and experimental concepts derived from recent research on prestressed beams, reinforced beams, dynamic train-bridge behavior, structural fatigue, and user comfort criteria, important points according to articles developed by Pu (2018) and Zhang and Wang (2024). The main objective is to present a simplified design methodology that, without replacing detailed analyses, allows for an understanding of the fundamental parameters of safety, durability, and efficiency of reinforced concrete beams for monorails in Latin American contexts, especially in our beloved Panama. The results show that the application of simplified criteria for loads and material properties provides a clear basis for teaching civil engineering, building engineering, and infrastructure engineering in a resource-limited environment. It also highlights the importance of considering environmental aspects, such as the acoustic impact and

sustainability of prestressed concrete, in the 100-year service life expected for the infrastructure. It concludes that the proposed simplified model is educational and applicable in the academic field, as well as constituting a preliminary validation tool for similar projects in the region.

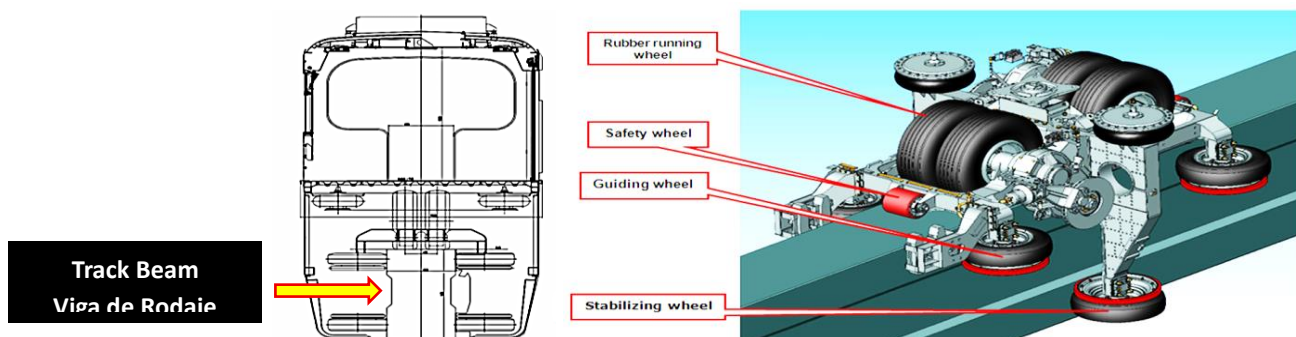
KEYWORDS: Monorail, Track Beam, Simplified Design, Prestressed Concrete, Durability

INTRODUCCION

El crecimiento urbano acelerado y los problemas de congestión vial en Panamá han impulsado la búsqueda de alternativas de transporte público sostenible, seguro y eficiente. En este contexto, la construcción de la Línea 3 del Metro de Panamá, basada en tecnología de monorraíl tipo straddle, representa el primer sistema de transporte elevado de este tipo en el país, con características que lo diferencian de los sistemas tradicionales de metro subterráneo o de superficie. Según He (2014), el monorraíl se caracteriza por utilizar vigas de rodaje de concreto reforzado o pretensado, sobre las cuales los trenes, equipados con ruedas de caucho, se apoyan, guían y estabilizan, como se muestra en la Figura 1 (p. 28). Este diseño ofrece ventajas en pendientes pronunciadas, radios de curvatura reducidos y menores impactos ambientales respecto a sistemas férreos convencionales. Experiencias internacionales en Chongqing (China), São Paulo (Brasil) y Bangkok (Tailandia) han demostrado su viabilidad técnica y económica en ciudades con topografías complejas.

Figura 1.

Sistema de monorraíl, conexión con el sistema de viga de concreto o “Track Beam”.



Nota. He, X. (s. f.). Aplicación y perspectivas del sistema de tránsito monorraíl tipo straddle en China.

La viga de rodaje de concreto reforzado constituye el elemento estructural más crítico del sistema, al actuar como soporte y guía de la superestructura ferroviaria. En la práctica, su diseño implica la consideración de cargas muertas, vivas, dinámicas, de frenado, impacto, sismo y viento, además de exigencias de durabilidad frente a ciclos de fatiga y condiciones ambientales tropicales. Sin embargo, los análisis detallados suelen involucrar modelos numéricos avanzados (elementos finitos tridimensionales, interacción tren–puente, dinámica no lineal), que, aunque indispensables para el diseño formal, resultan poco accesibles en el ámbito académico de pregrado conocer.

Por ello, este artículo tiene como propósito exponer un enfoque simplificado del diseño de vigas de monorriel de concreto reforzado, orientado a estudiantes de ingeniería civil y estructural de la Universidad de Panamá, sin dejar de lado el rigor científico. El análisis se sustenta en:

- AASHTO LRFD Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd ed., 2011
- AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 8th ed., 2017
- Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges
- Recommended LRFD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges
- Reglamento Estructural Panameño, REP 2024/REP 2021.
- Analysis and Design of Reinforced and Pre-tensioned Concrete Guideway Structures (ACI-358).
- Manual for the design, manufacture, transportation, installation, adjustment and maintenance of running trusses PC for monorail
- Una recopilación de estudios experimentales y numéricos publicados entre 2018 y 2025 sobre el comportamiento estructural de vigas de monorriel (Pu & Wang, 2018; Sirisonthi & Suparp, 2021; Suparp & Sirisonthi, 2022; Yao & Liu, 2024–2025; Zhang & Wang, 2024).

La relevancia del tema radica en que el monorriel, más allá de ser una innovación tecnológica en Panamá, realmente es un sistema ya utilizado en varios países. Este sistema, se erige como una alternativa replicable en otras ciudades latinoamericanas que enfrentan problemas similares de congestión y topografía. En este sentido, comprender los fundamentos de diseño de sus vigas constituye no solo un ejercicio académico, sino también un aporte estratégico para la formación de futuros ingenieros que deberán participar en la planificación y construcción de infraestructura resiliente y sostenible. En el contexto siguiente, se desarrollará un análisis detallado que incluye

el marco conceptual, la metodología aplicada, los resultados del enfoque simplificado y una discusión crítica de sus alcances y limitaciones, para finalmente establecer conclusiones y recomendaciones de aplicación futura.

MARCO CONCEPTUAL Y DESARROLLO

El monorriel tipo straddle se ha consolidado en las últimas dos décadas como una solución viable para ciudades medianas, montañosas o con limitaciones de espacio urbano, debido a su menor huella de suelo, capacidad de adaptarse a pendientes pronunciadas y radios de curvatura reducidos. A diferencia del metro convencional, que requiere túneles o amplias franjas subterráneas, el monorriel utiliza vigas de concreto pretensado o reforzado como elemento de soporte y guía, reduciendo costos de construcción hasta en un 40 % y tiempos de ejecución en aproximadamente un 30 %. En China, la ciudad de Chongqing opera desde hace más de 20 años el sistema de monorriel más extenso del mundo (aprox. 100 km), con un desempeño sobresaliente en topografías montañosas. En Brasil, el monorriel de São Paulo ha mostrado ventajas en corredores densamente urbanizados, mientras que, en Tailandia, la adopción de vigas continuas de gran longitud permitió reducir juntas y mejorar la comodidad del usuario. Estas experiencias internacionales constituyen referentes directos para Panamá, cuyo primer monorriel, la Línea 3 del Metro enfrenta condiciones topográficas y sísmicas similares.

Vigas de concreto reforzado y pretensado en monorrieles

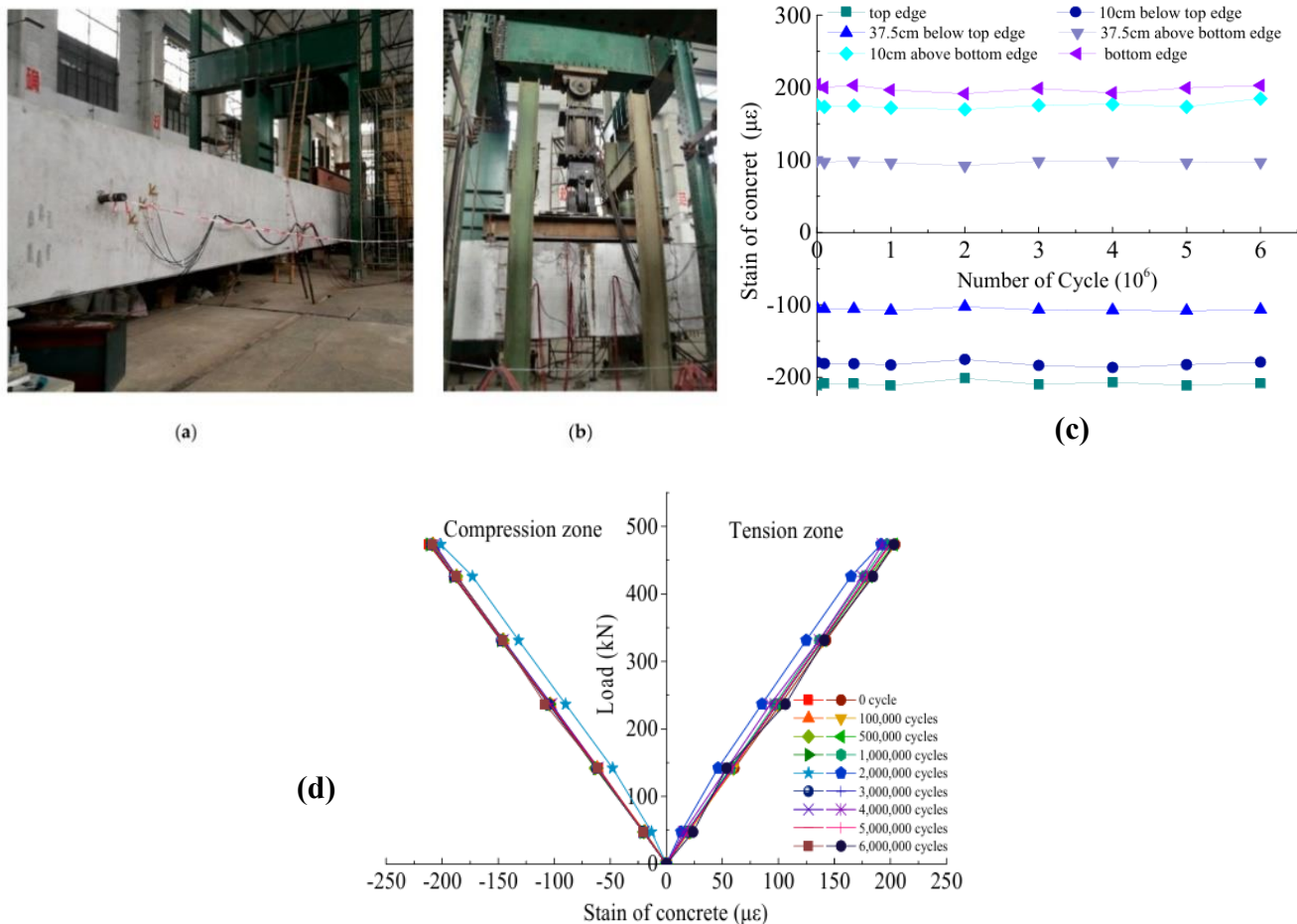
La viga de rodaje cumple la doble función de soporte estructural y guía del tren, integrando cargas estáticas, dinámicas y de fatiga en un solo componente. Generalmente, estas vigas son prefabricadas de concreto pretensado para optimizar la resistencia y minimizar deflexiones.

Investigaciones experimentales recientes han mostrado:

- La resistencia a fatiga de vigas pretensadas es un factor crítico, dado que el monorriel presenta una proporción elevada de carga viva (más del 50 % del total). En pruebas de laboratorio, vigas de 24 m de luz resistieron millones de ciclos sin agrietamiento significativo. Según lo presentado por Qianhui Pu , Hanyu Wang en Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beam for Straddle-Type Monorail Tracks. Figura 2

Figura 2.

Configuración de Configuración de carga, a) Muestra y dispositivo b) Detalle del sistema de prueba de materiales. c) Desarrollo patrón de fisuras en la mitad del tramo – Ejemplo de curvas de deformación del hormigón de carga.



Nota. Adaptado de Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beam for Straddle-Type Monorail Tracks, por Qianhui Pu, Hanyu Wang.

- La comparación entre vigas de un solo claro y vigas continuas ha demostrado que las segundas presentan una distribución más uniforme de deformaciones y menores concentraciones de esfuerzo en las juntas. Según lo mencionado por Suniti Suparp, Athasit Sirisonthi en Load versus Strain Relationships of Single and Continuous
- Span Full-Scale Pre-cast Prestressed Concrete Girders for Monorail Systems

- La rigidez lateral se ha identificado como un límite de diseño determinante para la seguridad y el confort del usuario, especialmente en sistemas turísticos y urbanos con altas demandas de estabilidad. Según lo investigado por HongZhang¹, Pengjiao Wang en An Experimental and Numerical Study on the Lateral Stiffness Limits of Straddle-Type Monorail Tour-Transit Systems

En el caso panameño, las vigas de la Línea 3 corresponden a elementos prefabricados de concreto pretensado con secciones huecas y vigas de concreto reforzadas en la zona de patio y talleres, ambos sistemas de vigas de rodaje deben ser capaces de resistir cargas de trenes de 6 vagones y garantizar una vida útil de 100 años.

Dinámica tren–puente y confort del usuario

El comportamiento dinámico del conjunto tren–viga–puente es esencial para garantizar la seguridad estructural y la comodidad de los pasajeros. Estudios recientes han modelado la interacción tren–puente mediante dinámica multibody y métodos de elementos finitos, demostrando que:

- Velocidades superiores a 80 km/h pueden amplificar significativamente las vibraciones verticales y laterales.
- Las irregularidades en el alineamiento de la vía son un factor que incrementa la vibración y el desgaste de las ruedas.
- La carga de pasajeros influye directamente en la respuesta dinámica: un aumento en el peso puede incrementar las deflexiones en el puente, pero paradójicamente reducir las vibraciones del tren, mejorando el confort.

Estos hallazgos confirman que el diseño simplificado debe incorporar factores dinámicos básicos, aun cuando no se disponga de modelos avanzados, especialmente en contextos académicos y de enseñanza.

Consideraciones ambientales y sociales

Más allá del diseño estructural, los monorrieles se enfrentan al reto del impacto ambiental, especialmente en zonas urbanas densas. Estudios en Chongqing y otras ciudades han identificado

que, aunque los sistemas de monorriel generan menor ruido que los trenes de acero sobre acero, las estructuras elevadas pueden transmitir vibraciones y ruido aéreo que afectan a comunidades cercanas. El ruido típico medido a 7.5 m del eje de vía alcanza entre 77 y 80 dB, valores comparables con el tránsito vehicular intenso, pero que pueden mitigarse mediante barreras acústicas y diseños de juntas optimizados. En Panamá, este aspecto es clave, considerando que la Línea 3 atravesará áreas residenciales en Arraiján y La Chorrera.

Tomando en consideración los aspectos antes mencionados, nos centramos en realizar un estudio que adopta un enfoque de diseño simplificado, orientado a fines académicos y de formación profesional, con la intención de realizar a futuro ingeniería de valor para estos sistemas. Dentro de las condiciones principales esta la identificación apropiada de las cargas.

Identificación de cargas

De acuerdo con AASHTO y la mayoría de las normas internacionales de forma muy general se puede describir los siguientes patrones de carga.

Figura 3.

- Cargas muertas (DC + DW): peso propio de la viga y de los acabados.
- Carga viva del tren (LL): peso de los vehículos (más del 50 % del total de carga).
- Carga de impacto (IM): asociada a arranque y frenado, estimada en 10–15 % de la carga viva.
- Carga centrífuga y de frenado (BR, CF): significativa en radios de curvatura menores a 100 m.
- Carga sísmica (EQ): definida según espectro de respuesta de Panamá, con base en AASHTO Seismic (2011).
- Cargas de viento (WS): especialmente relevantes en tramos elevados y sobre ríos.

Nota. Estas cargas se combinan mediante factores LRFD (Load and Resistance Factor Design), con énfasis en los estados límite últimos (ULS) y de servicio (SLS).

Propiedades de materiales

Los materiales prevista en forma global

- Concreto pretensado de alta resistencia: $f'_c = 50\text{--}60$ MPa.
- Acero de refuerzo con $f_y = 420$ MPa.
- Tendones de pretensado con $f_y = 1860$ MPa.

Estos valores coinciden con la información de diseño y ensayos experimentales reportados en la literatura internacional. Esto previendo las condiciones de carga mencionadas en la Figura 3.

Combinaciones de carga: Siguiendo AASHTO (2017), se consideran las siguientes combinaciones simplificadas, como las condiciones principales:

- ULS (factores de resistencia):
 - 1.25 DC + 1.5 LL + 1.75 IM
 - 1.25 DC + 1.5 EQ + 1.0 LL
- SLS (deflexiones y vibraciones):
 - 1.0DC + 1.0LL

Estas combinaciones permiten verificar tanto la seguridad estructural como la comodidad del usuario (limitación de deflexiones), dentro de un rango conservador y a manera de predimensionar la sección principal de la viga de rodaje. Para efectos didácticos, la viga se modela como una viga simplemente apoyada de luz $L = 24$ m (longitud típica en Panamá), con carga uniformemente distribuida q . La deflexión máxima bajo carga viva se estima mediante:

$$\delta_{max} = \frac{5qL^4}{384EI}$$

donde E es el módulo de elasticidad del concreto y I es el momento de inercia de la sección hueca o completa del girder o elemento estructural. Esta simplificación permite a los estudiantes estimar deflexiones y compararlas con límites normativos ($L/800 \approx 30$ mm), por ejemplo.

Los valores obtenidos en la memoria de cálculo confirmaron que las deflexiones reales bajo carga viva fueron menores al límite permitido, lo cual valida la confiabilidad del enfoque simplificado.

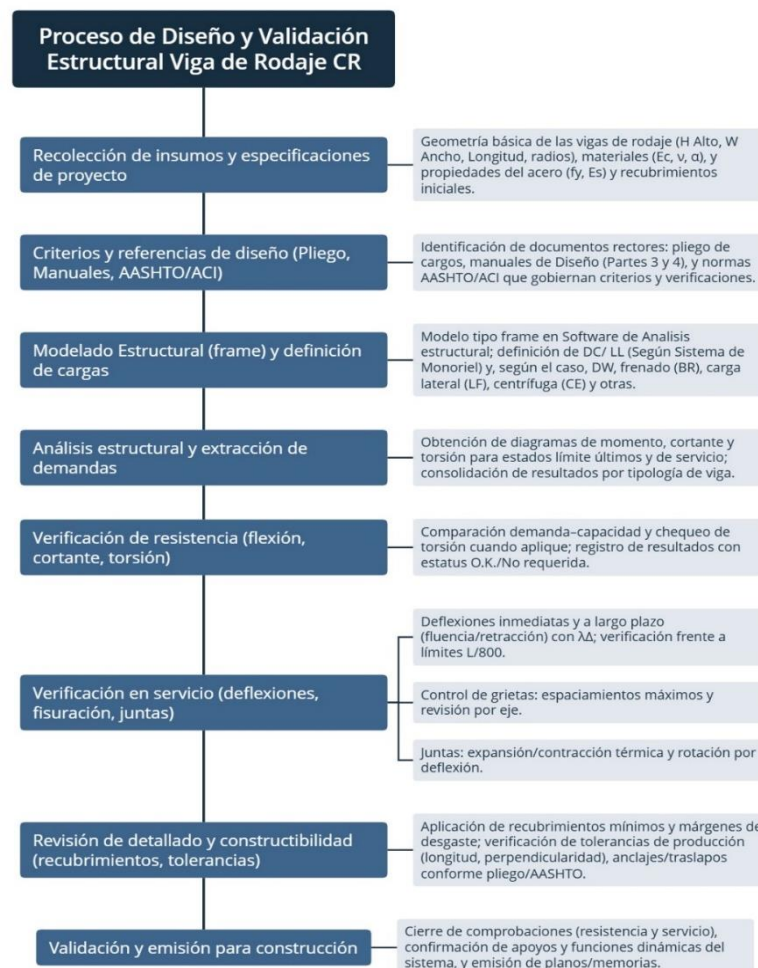
INVESTIGACION

Tomando todo lo investigado para este ensayo y realizando la siguiente hipótesis, ¿Cuál podría ser la geometría de sección mínima estimada para una viga de rodaje de estos sistemas?, debemos tomar en cuenta la rigidez y capacidad (flexión, cortante y control de deformaciones) que puede garantizar las condiciones de las cargas. Los estados límite de resistencia y servicio bajo combinaciones tipo AASHTO LRFD adaptadas a monorriel (peso propio, cargas de tren, frenado,

acciones centrífugas, viento y eventos especiales), y los criterios dinámicos de comodidad/operación (p. ej., límite de deformación lateral y respuesta acoplada tren–viga), son si-
dudas criterios muy necesarios considerar al plantear alternativas de fabricación e instalación en
un proyecto de esta naturaleza, al buscar un proceso de poder realizar una ingeniería de valor. El
flujograma de diseño para las consideraciones estipuladas tanto para la viga de concreto reforzada
como vigas de concreto pretensado para estos elementos podríamos definirlo de la siguiente
manera, ver figura 3.

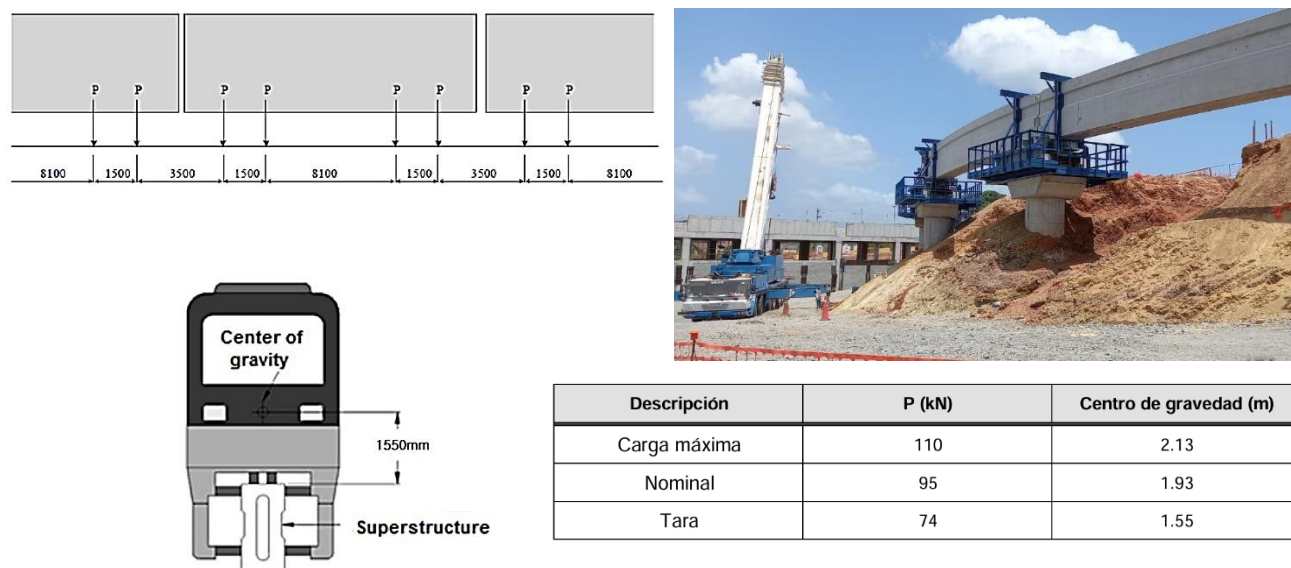
Figura 3

Plantilla de Proceso de Diseño y Validación Estructural para Ingeniería de Valor.



pp.82-98

Para realizar nuestro ejemplo tomaremos como base un prototipo de 4 vigas de concreto reforzado 10, 12 15 y 20 m analizadas únicamente como apoyadas simplemente y utilizando un patrón de carga de monorriel con las siguientes configuraciones geométrica.

Figura 4.

Nota. Patrón de carga viva, monorriel Hitachi muestra de sistema de monorriel, Fuente Hitachi Ltd. Cargas aproximadas.

Considerando las condiciones de carga mencionadas y implementando una sección típica de 85 cm de ancho x 150 cm de alto, concreto $f_c = 510 \text{ Kg/cm}^2$ se procede a realizar las estimaciones correspondientes. Solo consideramos para este ejercicio estado límite de resistencia 1 y Servicio 1. Se considera vigas de tramos rectos y buscamos poder estimar el comportamiento de la viga de rodaje considerando los factores de impacto dinámico y solo para condiciones de gravedad y funcionalidad de deformación. Se considera para efectos prácticos que se encuentra en una zona de velocidad reducida y no está cargado con carga de personas, para simplificar las estimaciones.

RESULTADOS

Figura 5.

Tabla de comparativa de resultados y estimaciones de esfuerzo cortante, momento y capacidad.

Ancho	SECCION TIPICA		Impacto Dinamico	q_LL,u Ton / ml	q_D,u Ton / ml	q_Total Ton / ml	V Ult Ton	Mult Ton-m
	Alto	Longitud						
0.85	1.5	20	0.286	5.093	4.349	9.442	98.20	491.00
0.85	1.5	15	0.308	6.900	4.349	11.249	87.80	329.24
0.85	1.5	12	0.323	8.330	4.349	12.679	81.63	244.88
0.85	1.5	10	0.333	10.560	4.349	14.909	77.55	193.87

ϕ Vc Ton	ϕ Vs Ton	ϕ Vc Ton	ϕ Mn Ton-m	As aprox cm ²	D/C Momento	D/C Corte
112.1	78	190.1	544.99	102	0.90	0.52
112.1	78	190.1	384.52	71	0.86	0.46
112.1	78	190.1	276.77	51	0.88	0.43
112.1	78	190.1	222.35	41	0.87	0.41

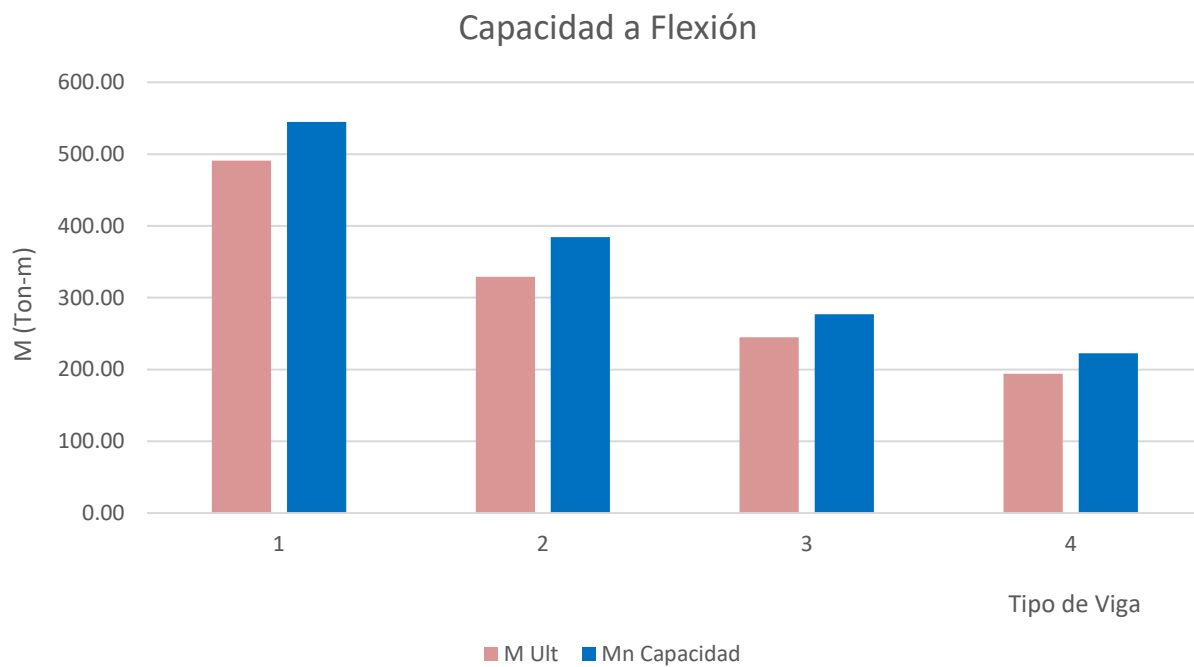


Figura 6.

Tabla condiciones de Servicio I. considerando el factor de Impacto.

Tabla — Servicio I (LL + IM)

L (m)	IM	N ejes	q_serv (kgf/ml)	$\delta_{inmediata}$ (mm)	$\lambda\Delta$	Δ_{largo_plazo} (mm)	δ_{total} (mm)	Límite L/800 (mm)	¿Cumple?	Ratio
10	0.333	4	4,025	0.57	1.9	1.09	1.66	12.5	Sí	0.13
12	0.323	4	3,327	0.98	2.12	2.08	3.06	15	Sí	0.20
15	0.308	5.2*	3,421	2.46	1.822	4.48	6.94	18.75	Sí	0.37
20	0.286	6	2,911	6.62	1.9	12.57	19.18	25	Si	0.77

Diagrama de Deflexiones

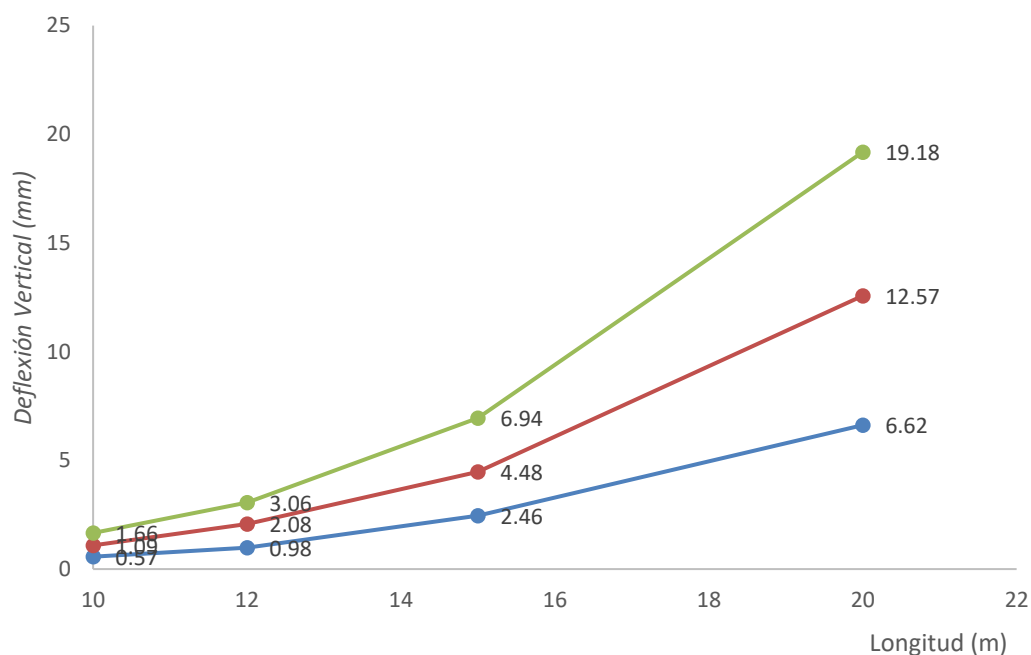
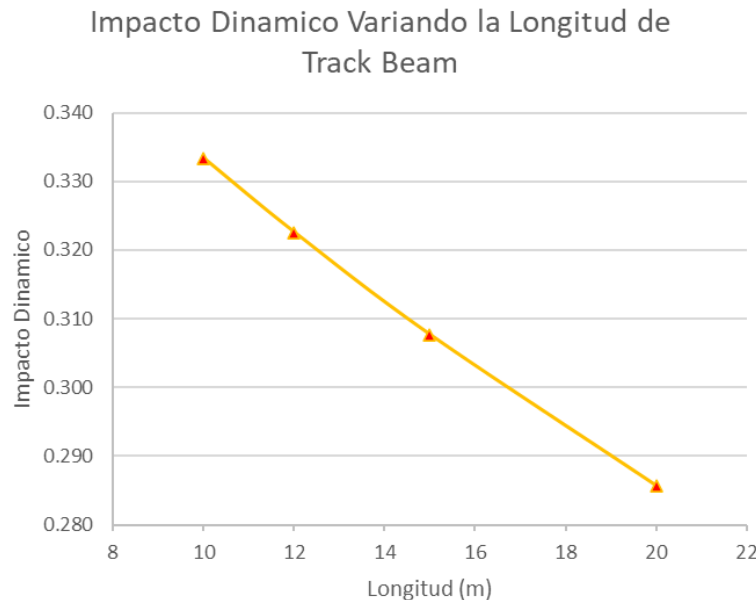


Figura 7.

Factor de Impacto según longitud de track-beam.



Nota. Datos elaborado durante la investigación, datos del autor.

CONCLUSIONES

El análisis simplificado realizado confirma que la metodología propuesta constituye una herramienta válida para la comprensión inicial del diseño de vigas de rodaje en sistemas de monorriel. Los resultados obtenidos en los prototipos de 10, 12, 15 y 20 m muestran que, aun bajo condiciones conservadoras de carga y factores dinámicos, las deflexiones permanecen por debajo de los límites normativos ($L/800$), garantizando así un desempeño estructural aceptable en términos de seguridad y servicio. Asimismo, los ejercicios demuestran que la incorporación de factores de impacto dinámico y criterios de confort del usuario no solo es factible en un esquema simplificado, sino que también aporta una visión integral de seguridad y funcionalidad. Se evidencia que este enfoque puede emplearse como recurso didáctico en la formación universitaria y como soporte inicial en contextos de recursos limitados, previo al uso de modelos numéricos avanzados.

Finalmente, se destaca que futuras investigaciones deben orientarse a: (i) ampliar la validación experimental mediante ensayos dinámicos de campo, (ii) explorar alternativas de pretensado y secciones optimizadas, y (iii) aplicar sistemas de monitoreo estructural con sensores que permitan evaluar el desempeño en operación. Estos aspectos son esenciales para garantizar la durabilidad y sostenibilidad del primer sistema de monorriel en Panamá y para consolidar la transferencia de este conocimiento hacia otros proyectos latinoamericanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- A.F.A.D. Mello, R.A.D. Souza, Analysis and design of reinforced concrete deep beams by a manual approach of stringer-panel method, *Lat. Am. J. Solids Struct.* 13 (6) (2016) 1126–1151.
- American Concrete Institute (ACI)-ASCE Committee 343, Guide for the Analysis and Design of Reinforced and Prestressed Concrete Guideway Structures, ACI 343.1R-12, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2012.
- ASTM, S, Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-steel Bars for Concrete Reinforcement, ASTM A615/A615M-09b, 2009.
- ASTM A416, Standard Specification for Low-relaxation, Seven-wire Steel Strand for Prestressed Concrete, ASTM, West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM C109, A, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), *Annual Book of ASTM Standards Annual Book of ASTM Standards* 4 (1) (2013) 1–9.
- ASTM C307-18, Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- Cervenka, V., L. Jendele, J. Cervenka, ATENA Program Documentation Part. Cervenka Consulting Sro, 2000.
- Cervenka, V., y J. Cervenka, R. Pukl, ATENA—a tool for engineering analysis of fracture in concrete, *Sadhana* 27 (4) (2002) 485–492.
- Friendly, Safe and Resource Efficient International Association for Bridge and Structural Engineering Chulalongkorn University, Thailand Asian Institute of Technology, 2009.

- He, X. (2015). Application and prospect of straddle monorail transit system in China. *Urban Rail Transit*, 1(1), 26–34. <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0006-9>
- Hussain, Q. y P. Joyklad, Effect of lateral reinforcement ratio on strength and ductility of RC columns, *Kasem Bundit Engineering J.* 7 (1) (2017) 1–16.
https://monorailex2021.org/wp-content/uploads/2021/10/P17-Panama-L3-Monorail-Project_MTorre_HITACHI.pdf
<https://mohua.gov.in/upload/uploadfiles/files/6.Hitachi.pdf>
https://www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/06/08/r2001_04_104.pdf
- Hussain, Q., A. Pimanmas, Shear strengthening of RC deep beams with sprayed fiber-reinforced polymer composites (SFRP): part 2 Finite element analysis, *Lat. Am. J. Solids Struct.* 12 (2015) 1266–1295.
- Kimijima, N, H. Takahashi, I. Kawabata, S. Matsuo, New urban transport system for middle east monorail system for Dubai Palm Jumeirah transit system, *Hitachi Review* 59 (1) (2010) 47.
- Li, C. H and Z. J. Lu, “An innovative straddle monorail track switch design for the personal rapid transit,” *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 28, no. 3, p. 370, 2021.
- L.R.F.D. Aashto, *Bridge Design Specifications*, 1998.
- Peng, J. S., Kong, Q. W., Gao, Y. X., & Zhang, L. (2023). Straddle monorail noise impact evaluation considering acoustic propagation characteristics and the subjective feelings of residents. *Electronic Research Archive*, 31(12), 7307–7336.
<https://doi.org/10.3934/era.2023370>
- Pu, Q., Wang, H., Gou, H., Bao, Y., & Yan, M. (2018). Fatigue behavior of prestressed concrete beam for straddle-type monorail tracks. *Applied Sciences*, 8(7), 1136.
<https://doi.org/10.3390/app8071136>
- Ritdumrongkul, S, W. Ritthichauy, H. Omi, Design of Palm Jumeirah Monorail. In *IABSE Symposium Bangkok 2009. Sustainable Infrastructure, Environment*
- Shaaban, I.G. y M. Said, Finite element modeling of exterior beam-column joints strengthened by ferrocement under cyclic loading, *Case Stud. Constr. Mater.* 8 (2018) 333–346.
- Shamsi M. and A. Ghanbari, “Seismic retrofit of monorail bridges considering soil-pile-bridge-train interaction,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 25, no.10, Article ID 04020075, 2020.
- Sirisonthi, A., P. Julphunthong, S. Suparp, P. Joyklad, Construction Techniques and Development of 1st Monorail System in Thailand, *20th Congress of IABSE. New York City 2019: the Evolving Metropolis - Report*, 2019, 2019, pp. 2387–2396.

- Suparp, S., Sirisonthi, A., Ali, N., Saad, N., Chaiyasarn, K., Azab, M., Joyklad, P., & Hussain, Q. (2022). Load versus strain relationships of single and continuous span full-scale pre-cast prestressed concrete girders for monorail systems. *Buildings*, 12(8), 1164. <https://doi.org/10.3390/buildings12081164>
- Xin, L., Z. Du, J. Zhou, Z. Yang, and Z. Xu, “Study on dynamic response of straddle-type monorail vehicle with single-axle bogie under curve condition,” *Mechanics*, vol. 27, no. 2, pp. 122–129, 2021. [4] J. Nie, M. Tao, L. Wu, X. Nie, F. X. Li, and F. L. Lei, “Advances of research on steel-concrete composite bridges,” *China Civil Engineering Journal*, vol. 45, no. 06, pp. 110–122, 2012, (in Chinese).
- Xu, X., Lu, H., Hua, X., & Chen, Q. (2022). An investigation on dynamic characteristics of the straddle-type monorail system under spatial alignment. *Machines*, 10(9), 724. <https://doi.org/10.3390/machines10090724>
- Yao, Z., Liu, Z., & Zhong, Z. (2025). A dynamic interaction analysis of a straddle monorail train and steel–concrete composite bridge. *Buildings*, 15(13), 2333. <https://doi.org/10.3390/buildings15132333>
- Zhang, H., Wang, P., Li, Q., Jin, J., Wei, S., Guo, F., Feng, C., & Deng, Q. (2024). An experimental and numerical study on the lateral stiffness limits of straddle-type monorail tour-transit systems. *Buildings*, 14(10), 3111. <https://doi.org/10.3390/buildings14103111>
- Zhou, S., Yu, P., & Nie, J. (2022). Static and dynamic characteristics of steel–concrete composite track beam of straddle monorail with cluster-distributed studs. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2022/9570045>