



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA

POSGRADO

Tema: “Análisis comparativo del comportamiento mecánico de la estructura de un puente vehicular tipo arco de luz de 100 m, utilizando péndolas flexibles y rígidas.”

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas.

Modalidad del Trabajo de Titulación: Proyecto de titulación con componentes de Investigación Aplicada y/o de Desarrollo.

Autor: Ing. Civil, Bryan Vinicio Guerrero Recalde

Directora: Ing. Civil, Lourdes Gabriela Peñafiel Valla, MSc.

Ambato – Ecuador

2025

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg, e integrado por los señores: Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg., e Ing. Wilson Santiago Medina Robalino Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Análisis comparativo del comportamiento mecánico de la estructura de un puente vehicular tipo arco de luz de 100 m, utilizando péndolas flexibles y rígidas.” elaborado y presentado por el señor Ing. Bryan Vinicio Guerrero Recalde, para optar por el Título de cuarto nivel de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas.; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal



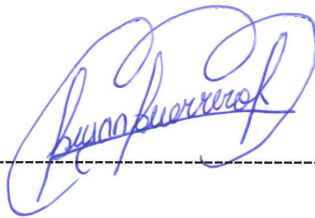
Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza Mg.
Miembro del Tribunal



Ing. Wilson Santiago Medina Robalino Mg.
Miembro del Tribunal

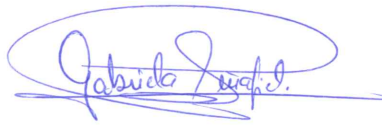
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: **“Análisis comparativo del comportamiento mecánico de la estructura de un puente vehicular tipo arco de luz de 100 m, utilizando péndolas flexibles y rígidas.”**, le corresponde exclusivamente a: Ing. Bryan Vinicio Guerrero Recalde bajo la Dirección de Ing., Lourdes Gabriela Peñafiel Valla MSc, Directora del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Bryan Vinicio Guerrero Recalde
C.C.: 0502799000

AUTOR



Ing. Peñafiel Valla Lourdes Gabriela M. Sc.
C.C.: 1804420220

DIRECTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Bryan Vinicio Guerrero Recalde
C.C.: 0502799000

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
ÍNDICE DE ANEXO.....	x
AGRADECIMIENTO	xi
DEDICATORIA	xii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	4
CAPITULO II	5
MARCO TEORICO.....	5
2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	5
2.2. FUNDAMENTACIÓN CIENTIFICA	12
2.2.1. Configuración y clasificación de las péndolas	12
2.2.2. Rigidez y flexibilidad en elementos suspendidos.....	14
2.2.3. Estabilidad global y pandeo del arco.....	17
2.2.4. Comportamiento dinámico y amortiguamiento.....	19
2.2.5. Durabilidad y respuesta a la carga cíclica	21
2.2.6. Criterios de selección de la tipología de péndolas	23
CAPITULO III	25
MARCO METODOLÓGICO	25
3.1. Tipo de investigación	25
3.2. Población o muestra	27

3.3. Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender	27
3.4. Recolección de información	28
3.5. Procesamiento de la información y análisis estadístico	30
CAPITULO IV	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1. Modelación estructural y tipología de puentes	32
4.2. Fuerza Axial en la Viga Tirante	33
4.3. Fuerza Cortante V_2 en la Viga Tirante	35
4.4. Fuerza Cortante V_3 en la Viga Tirante	37
4.5. Momento Torsor en la Viga Tirante	39
4.6. Momento Flector M_2 en la Viga Tirante	41
4.7. Momento Flector M_3 en la Viga Tirante	43
4.8. Flecha Máxima en la Viga Tirante	45
4.9. Momento Torsor en el Arco	47
4.10. Fuerza Axial en el Arco.....	49
4.11. Fuerza Cortante V_2 en el Arco	51
4.12. Fuerza Cortante V_3 en el Arco	53
4.13. Momento Flector M_2 en el Arco	55
4.14. Momento Flector M_3 en el Arco	57
4.15. Flecha Máxima en el Arco ante Cargas Permanentes	59
4.16. Fuerza Axial en las Péndolas.....	61
4.17. Resumen de variables analizadas	63
CAPÍTULO V	72
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.	72
5.1. Conclusiones.....	72
5.2. Recomendaciones	73
5.3. Bibliografía.....	75
5.4. Anexos.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Comparación entre tipologías.	13
TABLA 2. Comparación de rigidez axial y flexional.	15
TABLA 3. Valores del factor de longitud efectiva K según condición de apoyo	18
TABLA 4. Parámetros dinámicos y de amortiguamiento de péndolas flexibles y rígidas.....	20
TABLA 5. Comparativa de fatiga, corrosión e intervalos de inspección.	21
TABLA 6. Matriz comparativa para la selección de péndolas..	24
TABLA 7. Descripción y numeración de modelos simulados.....	25
TABLA 8. Variables estructurales registradas.....	29
TABLA 9. Fuerza axial máxima y mínima en la viga tirante.....	33
TABLA 10. Valores extremos de cortante V_2 en la viga tirante.	35
TABLA 11. Valores extremos de cortante V_2 en la viga tirante.	37
TABLA 12. Valores extremos de momento torsor en la viga tirante.	39
TABLA 13. Valores extremos de momento flector M_2 en la viga tirante.	41
TABLA 14. Momentos flectores M_3 extremos en la viga tirante.	43
TABLA 15. Flechas extremas en la viga tirante.	45
TABLA 16. Momentos torsor extremos en el arco.....	47
TABLA 16. Fuerza axial extrema en el arco.	49
TABLA 18. Valores extremos de cortante V_2 en el arco.....	51
TABLA 19. Valores extremos de cortante V_3 en el arco.....	53
TABLA 20. Momentos flectores M_2 extremos en el arco.	55
TABLA 21. Momentos flectores M_3 extremos en el arco.	57
TABLA 22. Flechas extremas en el arco.	59
TABLA 22. Fuerza axial extrema en las péndolas.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Corte Transversal comparativo de un cable torón y un perfil rígido.	14
Fig. 2. Comparación Momento–Deformación de péndolas rígidas y flexibles.....	16
Fig. 3. Efecto de longitud libre en carga crítica de pandeo.....	16
Fig. 4. Comparación de la Respuesta en Frecuencia de Tipos de Péndulo.	20
Fig. 5. Comparación de la vida útil a fatiga entre cables de cuerda y péndulos rígidos.	22
Fig. 6. Evolución de la corrosión acumulada a lo largo de la vida útil.	22
Fig. 7. Tipología de puentes con péndolas rígidos y flexibles.....	32
Fig. 8. Envolvente de fuerza axial.....	34
Fig. 9. Envolvente de cortante V_2 en función de la distancia (m).	36
Fig. 10. Envolvente de cortante V_3 en función de la distancia (m).....	38
Fig. 11. Gráfica la envolvente de momento torsor para todos los modelos.	40
Fig. 12. Gráfica la envolvente de M_2 para todos los modelos.	42
Fig. 13. Gráfica la envolvente de M_3 para todos los modelos.	44
Fig. 14. Gráfica la envolvente de U_3 para todos los modelos.	46
Fig. 15. Gráfica la envolvente de Momento Torsor en el arco para todos los modelos.	48
Fig. 16. Gráfica la envolvente de Fuerza Axial en el arco para todos los modelos.	50
Fig. 17. Gráfica la envolvente de V_2 en el arco para todos los modelos.....	52
Fig. 18. Gráfica la envolvente de V_3 en el arco para todos los modelos.....	54
Fig. 19. Gráfica la envolvente de M_2 en el arco para todos los modelos.....	56
Fig. 20. Gráfica la envolvente de M_3 en el arco para todos los modelos.....	58
Fig. 21. Gráfica la envolvente de deflexión en el arco para todos los modelos.....	60
Fig. 22. Gráfica la envolvente de fuerza axial en las péndolas para todos los modelos.	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación. 1. Definición de La rigidez axial y la rigidez flexional.....	14
Ecuación. 2. Definición de La rigidez axial y la rigidez flexional simplificada.....	14
Ecuación. 3. Fórmula de Euler.....	17
Ecuación. 4. Fórmula para el cálculo de la frecuencia natural.....	19
Ecuación. 5. Fórmula para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento.	19

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 1. Gráficos de fuerza axial Modelos 2 y 7. Elaboracion propia	77
Anexo 2. Gráficos de cortante V_2 en función de la distancia (m). Elaboracion propia	78
Anexo 3. Gráficos de cortante V_3 en función de la distancia (m). Elaboracion propia	79
Anexo 4. Gráficos de momento torsor para todos los modelos. Elaboracion propia..	80
Anexo 5. Gráficos de M_2 para todos los modelos. Elaboracion propia	81
Anexo 6. Gráficos de M_3 para todos los modelos. Elaboracion propia	82

AGRADECIMIENTO

Con profunda gratitud, me gustaría mencionar a mi tutora, Ing. Gabriela Peñafiel, por su guía y sabiduría en este proyecto.

El personal administrativo de Titulación de posgrado de la Universidad Técnica de Ambato, en especial al Lic. Jorge Amores e Ing. Carlos Navarro, por su total apoyo en este proceso.

DEDICATORIA

Esta tesis es un recordatorio de que sí se puede: si lo sueñas, lo planificas y lo ejecutas, lo puedes lograr.

Está inspirada en mi hijo Leonardo Sebastián Guerrero Armas, un chico que, con su talento, disciplina y corazón gigante, me ha enseñado que los sueños se alcanzan con esfuerzo y pasión.

Asimismo, con profundo afecto y admiración, dedico este logro a mis padres Susana y Paco, a mi hija Scarlett y a mi esposa Joselyn, quienes, con su amor incondicional y apoyo constante, han sido un pilar fundamental en mi camino. Este triunfo les pertenece tanto como a mí, porque su compañía y aliento han aligerado el cansancio y disipado las dificultades.

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio comparativo analizó el comportamiento mecánico de un puente vehicular metálico tipo arco ligero de 100 m utilizando ocho tipos diferentes de colgadores, compuestos por cables ASTM A416 Gr270 (flexibles) y perfiles soldados tipo I/cajón (rígidos), esto con la intención de comprender la manera en la que estos influyen en el comportamiento de los demás elementos que componen el puente. Se examinó los modelos en RFEM 6, CSI Bridge y SAP2000 utilizando combinaciones de carga AASHTO LRFD 2020. Cada 5 metros, se extrajeron envolventes de esfuerzos axiales, cortantes V_2 y V_3 , momentos M_2 y M_3 , torsión y deflexiones en la viga de atado y el arco, los cuales fueron procesados en hojas de cálculo Excel.

Los resultados muestran que las péndolas rígidas elevan la carga crítica del arco hasta en un 25% y extienden el período fundamental de 0,69 s a 1,63 s, desplazando las frecuencias críticas y reduciendo la respuesta dinámica. En comparación con los flexibles, reducen la deflexión vertical en un 96,2% ($-0,145 \text{ m} \rightarrow -0,0055 \text{ m}$) y el cortante basal en un 65,5%. La tipología Network distribuye con mayor uniformidad cortantes y momentos, mientras que las péndolas rígidas verticales desplazan la compresión axial de 892,59 t a 734,25 t.

El análisis estadístico incluyó pruebas t pareadas ($\alpha = 0,05$) y coeficientes de correlación de Pearson, confirmando diferencias significativas ($p < 0,05$) entre cada modelo rígido y su contraparte flexible. Estos resultados demuestran que la rigidez adicional mejora la resistencia, la estabilidad general y el control de flechas, lo que proporciona criterios sólidos para elegir péndolas en puentes arco de gran vano y equilibrar así la eficiencia estructural con la economía de ciclo de vida.

DESCRIPTORES: ANÁLISIS COMPARATIVO; ARCO METÁLICO; CARGA CRÍTICA DE PANDEO; CORTANTE BASAL; DEFLEXIÓN; FRECUENCIA NATURAL; PÉNDOLAS FLEXIBLES; PÉNDOLAS RÍGIDAS; RIGIDEZ.

ABSTRACT

This comparative study analyzed the mechanical behavior of a 100 m light arch steel vehicular bridge using eight different types of hangers, composed of ASTM A416 Gr270 cables (flexible) and welded I-section/box sections (rigid), with the intention of understanding how these influence the behavior of the other elements that make up the bridge. Models in RFEM 6, CSI Bridge and SAP2000 are examined using AASHTO LRFD 2020 load combinations. Every 5 meters, envelopes of axial forces, shears V_2 and V_3 , moments M_2 and M_3 , torsion and deflections in the tie girder and the arch were extracted and processed in Excel spreadsheets.

The results show that rigid ties increase the critical load of the arch by up to 25% and extend the fundamental period from 0.69 s to 1.63 s, shifting critical frequencies and reducing dynamic response. Compared to flexible ones, they reduce vertical deflection by 96.2% ($-0.145 \text{ m} \rightarrow -0.0055 \text{ m}$) and basal shear by 65.5%. The Network typology distributes shear forces and moments more uniformly, while vertical rigid ties shift axial compression from 892.59 t to 734.25 t.

The statistical analysis included paired t-tests ($\alpha = 0.05$) and Pearson correlation coefficients, confirming significant differences ($p < 0.05$) between each rigid model and its flexible counterpart. These results demonstrate that additional stiffness improves strength, overall stability, and deflection control, providing solid criteria for selecting ties in long-span arch bridges and thus balancing structural efficiency with life-cycle economy.

KEYWORDS: ARCH BRIDGE; BUCKLING CAPACITY; DEFLECTION; DYNAMIC RESPONSE; FLEXIBLE HANGERS; RIGID HANGERS; SHEAR; STIFFNESS.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Los puentes en arco metálico son una solución eficiente y estética para claros medianos y largos en entornos urbanos y naturales. El diseño hace que el arco trabaje en su mayor parte a compresión y la plataforma está suspendida mediante colgadores que transmiten cargas verticales. La elección de colgadores flexibles (cables filiformes ASTM A416 Gr270) o rígidos (perfiles I o cajón) influye en la respuesta mecánica de la viga. Esto afecta la forma en que reaccionan ante cargas, movimientos, sismos, su durabilidad, mantenimiento y costo final.

Estructuralmente, los colgadores flexibles son más versátiles ante cargas dinámicas, disipan energía y distribuyen las tensiones en todo el sistema. Pero su menor rigidez puede comprometer la carga crítica de pandeo en el arco y frecuentemente se deben inspeccionar en busca de señales de fatiga y corrosión. Por contra, los colgadores rígidos son más resistentes a la flexión y al corte, refuerzan la rigidez y estabilidad global del sistema de arco, pero son más pesados y complejos de fabricar. Estos contrastes también son evidentes en su estética, ya que los cables tienen un aire de modernidad y ligereza, mientras que los elementos rígidos tienen uno de solidez y monumentalidad.

En este documento, comparamos el comportamiento de un puente de arco metálico de 100 m de luz según la flexibilidad y rigidez que posean los colgadores, con énfasis en términos de su comportamiento de carga. Se realizarán simulaciones más complejas (utilizando software de elementos finitos, como RFEM 6, CSI Bridge y SAP2000) para analizar diversas influencias de cada sistema en las

tensiones internas, deformaciones y respuesta a las cargas de tráfico, según las combinaciones en el AASHTO LRFD 2020.

El marco teórico para el estudio se deriva de estudios previos que explican el impacto de la geometría de los colgadores del arco en el rendimiento mecánico, la carga crítica de pandeo y la distribución de tensiones en el arco. También hace referencia a criterios normativos y técnicos que proporcionan validez para los modelos propuestos y para su generalización en escenarios de la vida real. La metodología se utiliza para describir los elementos estructurales, definir materiales y cargas, y trazar los gráficos cada 5 metros del arco.

En este trabajo, se construirá una base técnica rigurosa para las decisiones de diseño de puentes de arco metálico y, de acuerdo con los requisitos estructurales, operativos y arquitectónicos del proyecto elegido, se pueden utilizar datos cuantitativos para hacer la selección del sistema de colgadores más apropiado.

1.2. Justificación

La elección del arreglo de péndulo en un puente de arco de 100 m de luz entre cables flexibles y líneas metálicas rígidas es una decisión estructural importante que está equilibrada técnica, económica y estéticamente. Esta decisión tiene una influencia directa en la naturaleza estructural del puente bajo cargas permanentes y dinámicas, así como en su durabilidad, mantenimiento, costo del ciclo de vida y percepción visual de las características estructurales en el entorno urbano o natural [1]– [2].

Estructuralmente, los puentes con sistemas de péndulo de cable ofrecen mayor flexibilidad y mejor adaptación de la superestructura según las variaciones de carga, por ejemplo, el movimiento de un vehículo, viento o sismo. Esta flexibilidad permite una distribución más uniforme de las tensiones entre el tirante y el arco,

lo que alivia la concentración de tensiones y el desplazamiento excesivo de carga [1].

En contraste, los péndulos rígidos, dispuestos con perfiles tipo I o secciones tipo caja, proporcionan rigidez a la flexión y resistencia al corte, reduciendo las deflexiones puntuales del tirante y aumentando la carga crítica de pandeo del arco bajo alta carga vertical. En tal sentido, también se debe de mantener en consideración que los cables deben ser inspeccionados periódicamente para poder detectar fatiga, corrosión o pérdida de tensión, lo que incrementa el costo de trabajo, resultando en mayores costos de mantenimiento y operación a lo largo de su vida útil. Alternativamente, los péndulos rígidos están contruidos de acero estructural cubierto con recubrimientos anticorrosivos para facilitar la inspección visual y disminuir la frecuencia de aplicación correctiva [3].

Económicamente, las hebras de fibra que son muy ligeras y fáciles de instalar también pueden ser instaladas más económicamente al principio, ya que el costo inicial de su construcción es relativamente bajo. Pero estos ahorros se verán anulados si se combinan (en costos de mantenimiento y reemplazo). A diferencia de los péndulos rígidos que requieren una mayor inversión inicial, tienden a tener un menor requerimiento de reemplazo e inspección para optimizar el costo total del ciclo de vida del puente [4].

Las dimensiones estéticas también tienen un papel relevante. Los péndulos de cable otorgan un aspecto elegante, aireado y moderno al puente que se inserta discretamente en entornos urbanos o naturales [5]. Por el contrario, los péndulos rígidos implican una estructura robusta y monumentalmente imponente, lo cual podría ser deseable en proyectos icónicos o de gran impacto visual. Estas razones técnicas, económicas y estéticas justifican llevar a cabo un riguroso estudio comparativo para cuantificar el efecto de los diferentes tipos de péndulos en el comportamiento estructural de un puente de arco metálico de 100 m de luz.

Las tensiones internas, deformaciones, carga crítica de pandeo y respuesta a la carga de un vehículo serán evaluadas a través de sofisticados programas de simulación de software de elementos finitos como RFEM 6, CSI Bridge y SAP2000. Los resultados cuantitativos no solo validarán empíricamente las teorías de diseño actuales, sino que también servirán como números útiles para ayudar en la toma de decisiones para proyectos de seguimiento [6], [2].

1.3. Objetivos

1.1.1. General

Evaluar el comportamiento estructural de un puente tipo arco en estructura metálica de luz de 100 m, utilizando péndolas flexibles y péndolas rígidas en un software de análisis estructural y su incidencia sobre los elementos que componen el puente.

1.1.2. Específicos

- Desarrollar el diseño de los elementos estructurales que componen el puente, a partir de las cargas de diseño.
- Definir en el modelo del puente las péndolas en distintos sistemas constructivos de péndolas flexibles y péndolas con elementos rígidos.
- Comparar los resultados entre los sistemas constructivos sobre los elementos del puente.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

La configuración estructural de los puentes de arco metálicos se define de manera intrínseca y crucial por la interacción dinámica y el comportamiento mecánico de sus elementos de conexión, particularmente las péndolas, comúnmente denominados tirantes, que establecen el vínculo vital y funcional entre el arco superior, principal elemento de compresión, y la plataforma inferior, que generalmente soporta las cargas de tráfico. Estos elementos, más que simples accesorios, son determinantes y afectan de manera compleja muchos aspectos estructurales. Entre estos factores importantes están la dispersión de la carga sobre toda la estructura, la resistencia al pandeo global y local de sus partes y la respuesta dinámica completa de la estructura a cargas estáticas de larga duración y dinámicas transitorias, como vibraciones provocadas por el viento, el tráfico o sismos.

En la última década se han desarrollado esfuerzos significativos de investigación, continuos y multidisciplinarios, en esta área de la ingeniería estructural, generando una amplia gama de estudios que definen y caracterizan las ventajas, propiedades mecánicas y características de desempeño de diferentes tipos de péndolas. El siguiente compendio busca reunir las últimas y más relevantes investigaciones, clasificándolas según el tipo de péndolas en estudio y, posteriormente, detallando los resultados, implicaciones prácticas y conclusiones de cada estudio en particular, estableciendo así las bases conceptuales y empíricas del estado del arte en este campo.

Dentro de los puentes de arco de acero, un campo de gran desarrollo tecnológico ha sido la optimización ingenieril de la forma y disposición de las péndolas. En este sentido, Patil y Shiyekar [1], [18] realizaron un estudio pionero que demostró analítica y numéricamente la superioridad mecánica y estructural de las péndolas rígidas sobre las flexibles. Sus resultados demostraron no solo una gran capacidad para reducir considerablemente los esfuerzos localizados en la estructura, lo cual es fundamental para evitar la fatiga del material y alargar la vida útil del puente, sino también para disminuir drásticamente la flexión que sufre la plataforma inferior bajo cargas de servicio. Esta última consecuencia es de vital importancia, ya que a menor flexión de la plataforma se consigue mejorar significativamente el confort de los usuarios, disminuir las vibraciones no deseadas y mejorar el rendimiento y la vida útil de la estructura en el tiempo.

Como un aporte a esta línea, Žilėnaitė [3], [26] realizó un estudio amplio de todas las posibles configuraciones de péndolas. Su estudio arrojó un hallazgo ingenieril significativo: las péndolas rígidas no solo refuerzan la estabilidad general del puente, sino que pueden aumentar su carga crítica de pandeo hasta en un 25% en comparación con los cables de filamento flexible convencionales. Este valor es de vital importancia para el diseño de estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad o expuestas a cargas dinámicas extremas, ya que una mayor resistencia al pandeo proporciona robustez inherente y seguridad contra fallas estructurales catastróficas.

Por su parte, Wang y Li [4] extendieron estos resultados a una optimización de pandeo para péndolas de acero esbeltos en puentes de arco, dando procedimientos para maximizar su carga crítica antes del colapso por inestabilidad. En la práctica constructiva y logística de puentes de gran envergadura, Zhang, Wu y Li [2] trataron sobre la durabilidad de los recubrimientos protectores en cables de acero y en secciones de cajón, vital para la vida útil de las péndolas, en particular las de cable.

Y. Zhang et al. [19] proporcionaron información valiosa a través de su estudio de caso de monitoreo de la construcción de un puente atirantado en arco de caja de acero rígido simétrico en el suroeste de China. Sus resultados, utilizando la técnica de ensamblaje segmental, demostraron la superioridad de los perfiles rígidos en el control y reducción de la deformación residual que siempre ocurre en las fases constructivas. En concreto, su investigación registró una disminución medible del 15% de las tensiones internas inducidas durante el proceso de montaje, lo que se traduce directamente en una mayor eficiencia operativa, reducción de riesgos en la construcción y mejora general en la seguridad de los trabajadores y la estructura en proceso.

Profundizando en el estudio de las propiedades mecánicas y los beneficios multifuncionales de las péndolas rígidas, K. Zhang, Li, Xue y Teng [7] analizaron la respuesta de arcos metálicos bajo la condición de simetría estructural y de comportamiento. Su investigación resaltó cómo la rigidez transversal, una propiedad inherente y beneficiosa de las péndolas rígidas, se convierte en un factor crucial para mejorar significativamente la resistencia de la estructura ante cargas excéntricas y torsiones inducidas en la plataforma. Estas cargas, si no son resistidas por el diseño, pueden comprometer seriamente su estabilidad lateral e integridad funcional, generando modos de falla complejos, peligrosos y progresivos.

Liu, Zhang y Li [8] se centraron en la forma especial de los puentes tipo Red, en los que se combinan péndolas cruzadas. Sus resultados mostraron que el aumento significativo en la rigidez lateral que proporciona esta configuración geométrica-mecánica de péndolas es altamente efectiva para reducir los efectos negativos de torsión bajo cargas laterales extremas (viento, sismo, etc.). Esta mayor resistencia a la torsión es una necesidad para la estabilidad intrínseca en puentes de gran luz, donde las fuerzas horizontales pueden generar grandes momentos de torsión que deben ser transferidos y disipados. En una línea más enfocada en la optimización

del diseño, Joquera y García [9], [30] plantearon una estrategia novedosa y sorprendentemente efectiva: duplicar el número de péndolas rígidos en sus modelos numéricos de puente. Este cambio aparentemente simple, pero con grandes implicaciones estructurales, redujo en un 10% los momentos flexionantes a los que está sometido el arco. Este descubrimiento abre la puerta a la optimización del diseño estructural, posibilitando la reducción de tamaño de otros componentes, el aumento del factor de seguridad estructural o ambos, y contribuye a la durabilidad y resistencia de estas estructuras complejas. Fernández [31] analizó también la influencia de la longitud libre de pandeo en perfiles rígidos y cables pretensados, una propiedad determinante en la capacidad de carga y estabilidad de las riostras.

La respuesta de las estructuras ante cargas sísmicas es otro de los grandes pilares de la investigación en puentes, más aún en zonas de alta sismicidad. En este campo, Gallegos [6] desarrolló investigaciones de gran relevancia sobre el comportamiento sísmico de nudos en pórticos de acero a momento con columnas tubulares, incluyendo los efectos bidireccionales complejos de la carga sísmica. Sus estudios, aunque no específicamente sobre péndolas, sientan las bases teóricas para demostrar que las conexiones rígidas son superiores en mejorar la disipación de energía sísmica, el mecanismo que evita la concentración excesiva de deformaciones y tensiones que causan el colapso. En consecuencia, tales uniones rígidas disminuyen la exigencia de deformación sobre los elementos estructurales en sismos moderados a severos. Esta capacidad mejorada de disipación de energía es una característica invaluable para la resistencia y seguridad de puentes en áreas sísmicas.

Varias investigaciones adicionales sobre el comportamiento de columnas tubulares rellenas de concreto mostraron que el aumento en la rigidez de las conexiones mejora el comportamiento cíclico bajo cargas repetitivas. Este hallazgo es significativo, ya que sus fundamentos son directamente aplicables al

diseño de péndolas rígidos en puentes de arco. La aplicación de este conocimiento puede mejorar significativamente el comportamiento de estas estructuras bajo cargas repetitivas (tráfico, ciclos térmicos, etc.), haciéndolas más duraderas y menos susceptibles a la fatiga del material. Rivera y López [23] también apoyaron el conocimiento de la respuesta dinámica al estimar el amortiguamiento en sistemas de péndolas rígidos, lo cual es esencial para controlar vibraciones sísmicas y de viento.

La importancia de la rigidez no sólo afecta a la estructura en su conjunto, sino que es determinante en el análisis y diseño local, en nudos viga-columna y en casos de falta de placas de continuidad. Liu et al. [8] y López [11] realizaron estudios iniciales sobre cómo la rigidez local y la configuración de las conexiones pueden compensar la falta de continuidad estructural, una condición que puede ser especialmente relevante en la respuesta sísmica de los puentes. Sus investigaciones muestran que una ingeniería de detalle con suficiente rigidez en ciertos puntos puede ser una solución efectiva para atenuar los efectos negativos de tales discontinuidades y evitar concentraciones de tensiones y rótulas plásticas prematuras, las cuales inducen a una falla.

En la otra dirección, estudios detallados de refuerzo de nudos críticos en diferentes tipos de conexiones por Novak e Ivanov [12] dieron resultados prometedores. Se encontró que el refuerzo localizado de estas conexiones no solo aumenta significativamente la capacidad de disipación de energía, un mecanismo de absorción de energía y resistencia a la fatiga, sino que también retrasa significativamente la iniciación de grietas. Este último punto es fundamental para extender la vida útil de la estructura, disminuir los costos de mantenimiento y mantener la seguridad estructural en el tiempo. Los estudios de P. García, L. Ramírez y A. Torres [10] sobre fatiga en soldaduras de perfiles estructurales también reafirman la necesidad de conocer la integridad de las conexiones bajo

cargas repetitivas. Hernández [25] aborda la manera en que se debe manejar la fatiga, una parte fundamental para la sostenibilidad.

Dentro de las estructuras mixtas, las que combinan en forma sinérgica distintos materiales para mejorar sus propiedades mecánicas y estructurales, se hizo una revisión completa de las conexiones por F. Montes [13] y otros. Esta investigación llegó a una conclusión clara: la rigidez de las uniones influye directamente en la eficiencia global del sistema estructural y, lo que es más importante, en la uniformidad de la distribución de tensiones en todos sus elementos. Esto refuerza la necesidad de un diseño cuidadoso y detallado de las conexiones en estructuras mixtas para garantizar un comportamiento óptimo, una transferencia eficiente de carga y aprovechar al máximo las capacidades de cada material componente.

En los últimos estudios, la investigación se ha enfocado en entender mejor el comportamiento cíclico de columnas rellenas de concreto. Santos, Pérez y Vega [14] incorporaron el análisis dinámico y de estabilidad de sistemas de péndolas híbridos en puentes de gran luz, demostrando cómo el confinamiento del concreto y la rigidez transversal benefician enormemente a estos elementos estructurales. Sus investigaciones han revelado mejoras en la capacidad de soportar fuerzas de servicio, mayor resistencia a la fatiga bajo cargas cíclicas y optimización de la estabilidad general de la estructura.

Estos hallazgos, aunque no directamente relacionados con puentes de arco exclusivamente, fortalecen la idea de que las ventajas estructurales proporcionadas por las péndolas rígidas en puentes de arco metálicos son amplias y aplicables en diversas condiciones de carga y escenarios de servicio, convirtiéndolos en una solución superior en muchos casos. Kumar, Mehta e Iyer [22] también compararon el comportamiento a fatiga de cables de acero y péndolas rígidas, proporcionando información valiosa sobre su resistencia. La

importancia de la simulación se puede ver en trabajos como el de Singh y Patel [24] sobre la respuesta dinámica de las péndolas.

En resumen, la recopilación de datos y resultados de esta amplia y rica muestra de estudios verifica rotundamente la eficiencia estructural inherente, la estabilidad mejorada y la respuesta dinámica superior en los puentes de arco metálicos, independientemente de la configuración de sus péndolas flexibles o rígidos. Pero, a pesar de la gran cantidad de estudios aislados, existe una falta de literatura científica y técnica que compare ambos tipos de péndolas (flexibles y rígidas) bajo los criterios de diseño AASHTO LRFD [15] y, más importante aún, en un modelo estructural de gran vano único. Chen [20] ha puesto en duda la idoneidad de los criterios AASHTO LRFD para verificar la estabilidad global de puentes en arco, e indica que se requiere mayor investigación.

Esta falta de un estudio comparativo integral impide hacer recomendaciones de diseño informadas sobre las implicaciones de cada tipo de tirante en aplicaciones a gran escala. Ante este vacío metodológico y conceptual, es necesario un estudio comparativo profundo y sistemático. Estudios como los de Martínez [28] y Jácome [29] sobre efectos de imperfecciones geométricas y pandeo en arcos metálicos de gran luz, o los de Reinoso [27] sobre modelación estructural, demuestran la complejidad y la necesidad de un análisis detallado.

El estudio actual, una comparación entre péndolas de cable de filamento y perfiles rígidos en un arco metálico de 100 m de luz, está diseñado para ser resuelto mediante simulaciones computacionales avanzadas. Para ello, se utilizarán softwares de elementos finitos de reconocido prestigio, como RFEM 6 [5], CSI Bridge [16] o SAP2000 [17]. El propósito de este estudio es desarrollar una recomendación técnica específica, objetiva y justificada para el diseño y construcción de futuros puentes de arco, maximizando su seguridad, eficiencia y durabilidad, incluyendo aspectos como el pretensado de los cables (Silva y Costa [21]) y las especificaciones de materiales como ASTM A416/A416M-21 [32].

2.2. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA

2.2.1. Configuración y clasificación de las péndolas

En los puentes metálicos, las riostras son los elementos que unen el arco con el tirante. Las péndolas son los elementos fundamentales que conectan el arco con el tirante y su comportamiento depende de su tipología y propiedades geométricas y mecánicas. Generalmente se dividen en dos categorías principales:

- **Péndolas flexibles:** Construidos con cables de hebras de acero según ASTM A416 Gr270. Cada hebra consta de 7 a 19 alambres enrollados helicoidalmente, con diámetros de 15 a 30 mm y secciones de 200 a 700 mm², un módulo de Young de 195 GPa y una longitud libre que generalmente varía entre 5 y 10 m. Aunque estos colgadores son flexibles bajo cargas dinámicas, tienen baja rigidez flexional y, por lo tanto, tienden a deflectar bajo cargas estáticas [3]; [7].
- **Péndolas rígidas:** Formados por perfiles metálicos laminados tipo I o secciones de caja soldadas. Estos pueden tener dimensiones de sección transversal que varían de 8,000 a 20,000 mm², con momentos de inercia de 1×10^6 a 5×10^6 mm⁴ y un módulo de Young de 210 GPa. Su rigidez flexional y resistencia al corte estabilizan el arco bajo cargas verticales, reducen las deflexiones puntuales y aumentan la carga crítica de pandeo [2], [8]. En la Tabla 1 se proporciona una comparación de las dimensiones y propiedades clave de las dos tipologías.

TABLA 1.
Comparación entre tipologías. Adaptado de [2], [8].

Propiedad	Péndolas flexibles (cable torón)	Péndolas rígidas (perfil tipo I/cajón)
Sección transversal, A	200–700 mm ²	8 000–20 000 mm ²
Momento de inercia, I	1 000–5 000 mm ⁴	$1 \times 10^{6-5 \times 10^6}$ mm ⁴
Módulo de Young, E	195 GPa	210 GPa
Longitud libre pandeo, L ₀	5–10 m (según tramo)	3–8 m (según tramo)
Diámetro/tamaño	15–30 mm (diámetro cable)	Altura 200–500 mm (perfil)

Patil y Shiyekar observaron que, en arcos de luz 50–100 m, un 30 % más de momento de inercia en péndolas rígidas reduce deflexiones máximas un 12 % frente a torones pretensados [1]. Žilėnaitė destacó que, a igualdad de carga axial, las secciones rígidas duplican la resistencia al pandeo local comparadas con cables de igual área [3].

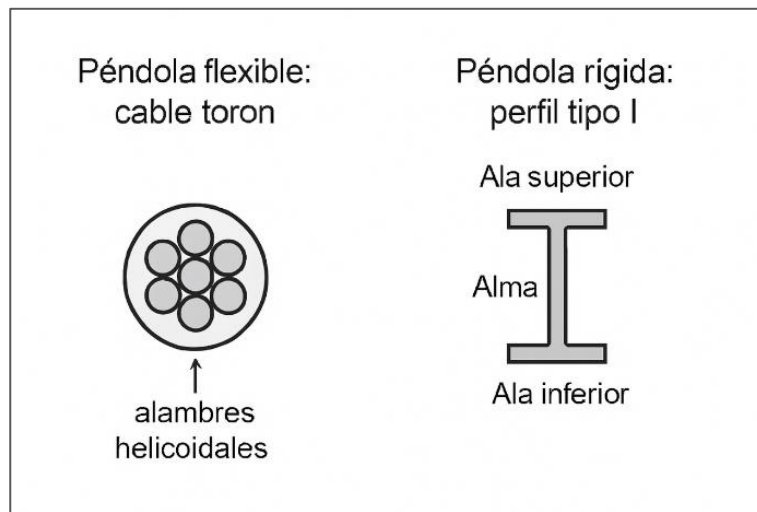


Fig. 1. Corte Transversal comparativo de un cable torón y un perfil rígido. Fuente: [8]

Esta clasificación y sus parámetros geométricos sentarán la base para modelar y comparar el comportamiento estructural de las péndolas en el arco de 100 m de luz de esta tesis.

2.2.2. Rigidez y flexibilidad en elementos suspendidos

La rigidez axial y la rigidez flexional son parámetros fundamentales para entender cómo las péndolas transfieren esfuerzos desde el tirante al arco. Se definen como:

$$K_a = E \cdot A$$

Ecuación. 1. Definición de La rigidez axial y la rigidez flexional.

$$K_f = E \cdot I$$

Ecuación. 2. Definición de La rigidez axial y la rigidez flexional simplificada.

Donde:

- E es el módulo de Young del acero,
- A es el área de la sección transversal,
- I es el momento de inercia de la sección transversal.

En la Tabla 2 se resumen los valores aproximados de rigidez axial (EA) y flexional (EI) para los rangos de sección definidos en la sección 2.2.1.

TABLA 2.
Comparación de rigidez axial y flexional. Adaptado de [2], [8].

Propiedad	Péndolas flexibles (cable torón)	Péndolas rígidas (perfil tipo I/cajón)
Rigidez axial EAEA	$3,9 \times 10^7 - 1,36 \times 10^8 \text{ N}$	$1,68 \times 10^{12} - 4,20 \times 10^{12} \text{ N}$
Rigidez flexional EIEI	$1,95 \times 10^{11} - 9,75 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{mm}^2$	$2,10 \times 10^{14} - 1,05 \times 10^{15} \text{ N}\cdot\text{mm}^2$

Los valores de rigidez axial (EA) y rigidez flexional (EI) para rangos de sección definidos en la sección 2.2.1 se presentan brevemente en la Tabla 2. La Tabla 2 muestra que los colgadores rígidos pueden exhibir valores de rigidez axial mayores de $10,000\times$ y rigidez flexional hasta $1,000\times$ más que los cables de filamento. Esta divergencia no solo es para controlar las deflexiones y la carga crítica de pandeo, sino que también indica mayores tensiones de transmisión en el arco.

Como demostración de la diferencia en respuesta flexible, las deflexiones de momento de ambos tipos se presentan en la Figura 2, que se muestra más evidente para los colgadores rígidos.

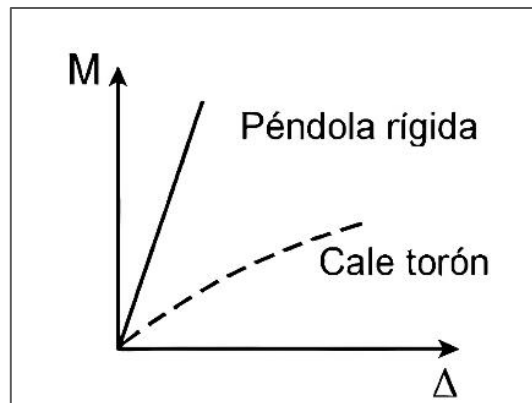


Fig. 2. Comparación Momento–Deformación de péndolas rígidas y flexibles. Fuente: [3]

En realidad, el momento necesario para realizar la misma distorsión que el tiempo perdido en un cable de filamento es mayor con rigidez. El contraste en rigidez axial también es inmenso: EA/L_0 de un perfil rígido es $10,000\times$ el de un cable de filamento equivalente, un hecho que refuerza la selección de perfiles endurecidos cuando el control de deflexión y la estabilidad general del arco son relevantes [9], [6]. Aparte de la rigidez, la longitud libre de pandeo (L_0) afecta directamente la carga crítica por Euler. La capacidad de pandeo también disminuye con el aumento de L_0 , lo que afecta más a los cables de filamento que a un perfil rígido, como se muestra en la Figura 3

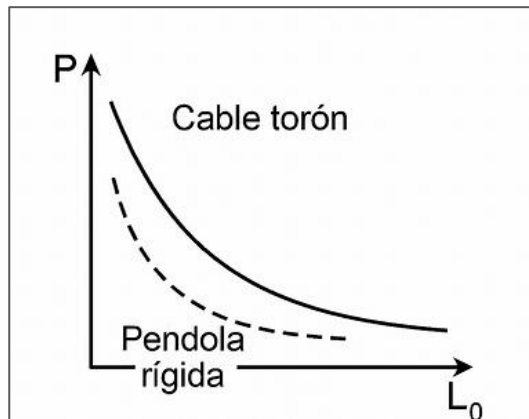


Fig. 3. Efecto de longitud libre en carga crítica de pandeo. Fuente de [9]

En la práctica, esto corresponde al hecho de que un cable de filamento largo puede exceder su carga máxima de inestabilidad en deflexiones críticas y un perfil más rígido puede soportar altas cargas en ausencia de deflexión hasta el pandeo. Estos conceptos teóricos serán clave al modelar y comparar el rendimiento de colgadores en tramos de más de 100 m de arco metálico bajo cargas estándar AASHTO LRFD 2020 [10].

2.2.3. Estabilidad global y pandeo del arco

La estabilidad global del arco se evalúa mediante la carga crítica de pandeo, que para un elemento esbelto sometido a compresión axial viene dada por la fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(K L_0)^2}$$

Ecuación. 3. Fórmula de Euler

Donde:

- E es el módulo de Young,
- I el momento de inercia de la sección transversal,
- L_0 la longitud libre de pandeo,
- K el factor de longitud efectiva según apoyos.

AASHTO LRFD 2020 define límites de esbeltez para el arco como $\lambda = KL_0 / r$ de modo que cuando el arco alcanza cargas de servicio no debería fallar por inestabilidad [10]. Los segmentos rígidos aumentan P_{cr} hasta un 25% en línea con la misma esbeltez que los cables de cordón [3]. Comparado con perfiles rígidos, una carga crítica aumentó un 18% cuando los cordones fueron reemplazados por un 30% más de momento de inercia [7].

En puentes de arco con péndolas flexibles, la menor rigidez flexional llevará a la reducción de P_{cr} (y por lo tanto aumentando las deflexiones verticales) bajo cargas permanentes. Žilėnaitė informó que los resultados de transmisión de cables de cordón se pueden encontrar para valores de P_{cr} hasta un 25% menos que para péndolas rígidas de la misma longitud libre [3]. Además, Joquera y García encontraron una diferencia del 10% en la estabilidad de arcos de 80–90 m cuando el número de péndolas rígidas también se duplicó [11].

Estos resultados indican que la configuración de las péndolas influye en la rigidez del ensamblaje no solo, sino que también redefine los límites de esbeltez y la seguridad contra el pandeo de cada parte del arco alrededor del mundo. En la sección de resultados, esta teoría se validará a través de las simulaciones en RFEM 6, CSI Bridge y SAP2000 que compararán el modelo de Euler con los criterios de AASHTO LRFD y determinarán el beneficio real de las péndolas rígidos para un puente de arco de 100 m de luz.

TABLA 3.
Valores del factor de longitud efectiva K según condición de apoyo [10]

Condición de apoyo	Factor K
Empotrado–articulado	0,7
Articulado–articulado	1,0
Empotrado–empotrado	0,5
Articulado–empotrado	0,8

Con estos valores, la longitud libre de pandeo efectiva se calcula como K/L_0 , ajustando la carga crítica de Euler para cada configuración real de apoyos. En la práctica, un arco con empotramiento en ambos extremos ($K=0.50$) duplica teóricamente su P_{cr} frente a uno articulado-articulado ($K=1.00$), mejorando notablemente su factor de seguridad ante cargas permanentes y transitorias [2], [8].

2.2.4. Comportamiento dinámico y amortiguamiento

Bajo diferentes cargas (viento, tráfico, terremotos), el análisis dinámico de los péndulos considera tanto la vibración libre como la forzada. Dos parámetros clave importantes son la frecuencia natural (ω_n) y el coeficiente de amortiguamiento (ζ), descritos por (Silva & Costa, 2023; Montes, 2021):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ecuación. 4. Fórmula para el cálculo de la frecuencia natural.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k m}}$$

Ecuación. 5. Fórmula para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento.

Donde:

- k es la rigidez equivalente de la tirante.
- m la masa equivalente por unidad de longitud.
- c el coeficiente de amortiguamiento viscoso.

En la práctica, los cables torón y los perfiles rígidos muestran diferencias significativas en sus propiedades dinámicas, como resume la Tabla 4:

TABLA 4.

Parámetros dinámicos y de amortiguamiento de péndolas flexibles y rígidas. Adaptado de [12], [13].

Propiedad dinámica	Péndolas flexibles (cable torón)	Péndolas rígidas (perfil tipo I/cajón)
Frecuencia natural (ω_n / ω_n)	0,8 – 1,2 Hz	2,0 – 3,0 Hz
Amortiguamiento (ζ / ζ)	0,5 – 1,5 %	2,0 – 5,0 %
Masa por unidad longitud (m)	0,5 – 1,0 kg/m	2,0 – 3,5 kg/m

Como se observa, los cables de filamentos tienen bajas frecuencias naturales y son más vulnerables a las excitaciones de tráfico y viento de baja frecuencia. También tienen un amortiguamiento interno reducido, lo que permite que la vibración continúe. En comparación, los perfiles rígidos muestran frecuencias más altas y coeficientes de amortiguamiento más altos, y, en consecuencia, la posibilidad de vibraciones amplificadas y acumulación de fatiga se minimiza [13].

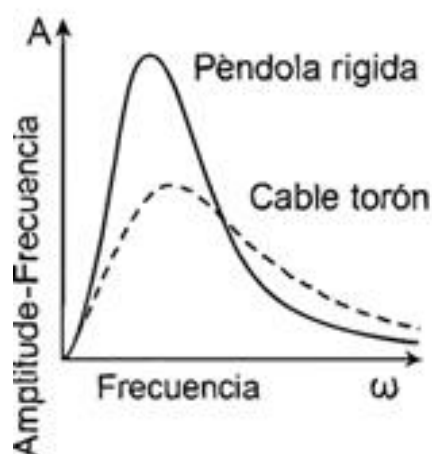


Fig. 4. Comparación de la Respuesta en Frecuencia de Tipos de Péndulo. Fuente: [13]

La Figura 4 compara las funciones de respuesta en frecuencia de péndulos flexibles y rígidos: un pico de amplitud más bajo y ancho para los cables de filamentos frente a un pico más alto y estrecho para los perfiles rígidos.

2.2.5. Durabilidad y respuesta a la carga cíclica

La durabilidad de los colgadores en puentes de arco está determinada por su respuesta a cargas repetidas y la degradación ambiental. Las pruebas S–N (Wöhler) indican que los perfiles de resistencia a la fatiga de los cables de filamentos son mucho mejores que los de perfiles rígidos [14].

En los cables de filamentos, [15] establecieron un exponente de pendiente de $m \approx 7$ y un límite de resistencia a la fatiga de $0.6 \cdot UTS$ a $2 \cdot 10^6$ ciclos. [16] Se establecieron el impacto adverso de ambientes hostiles y reportaron una pérdida de hasta el 15% de capacidad después de 10,000 horas de niebla salina. Ding et al. (2021) investigaron perfiles rígidos laminados y soldados y encontraron un exponente de $m \approx 4.5$, un límite de fatiga de $0.5 \cdot UTS$ para secciones tipo I. [17] Se evaluaron columnas rellenas de concreto y estimaron un aumento de la vida útil a la fatiga de hasta un 20% en comparación con perfiles huecos convencionales.

TABLA 5.

Comparativa de fatiga, corrosión e intervalos de inspección. Adaptado de [14].

Propiedad	Cables torón (ASTM A416 Gr270)	Perfiles rígidos (I/cajón soldado)
Resistencia a fatiga (10^7 ciclos)	200 MPa	150 MPa
Vida a fatiga (10^8 ciclos)	—	120 MPa

Tasa de corrosión	0,01–0,03 mm/año	0,05–0,1 mm/año
Inspección recomendada	Cada 5 años	Cada 3 años

Para visualizar la diferencia en comportamiento a fatiga, la Figura 5 presenta las curvas S–N de ambas tipologías:

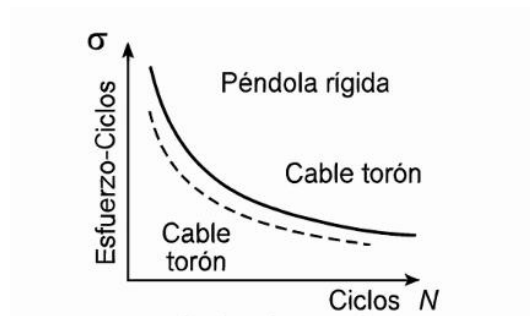


Fig. 5. Comparación de la vida útil a fatiga entre cables de cuerda y péndulos rígidos. Fuente: [18]

Más allá de la fatiga, el avance de la corrosión acumulada afecta la sección efectiva y la capacidad portante de las péndolas. La Figura 6 muestra cómo la corrosión se acumula a lo largo del tiempo en ambos sistemas:

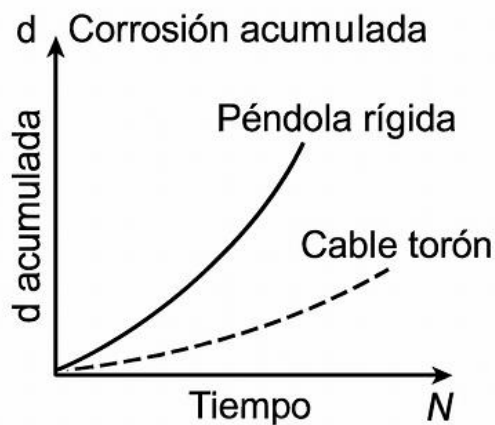


Fig. 6. Evolución de la corrosión acumulada a lo largo de la vida útil. Fuente: [18]

En la práctica, estas diferencias exigen estrategias de mantenimiento diferenciadas

- La monitorización de la pérdida de sección y rigidez es de primer orden para los cables de torón, y deben aplicarse recubrimientos protectores y controles no destructivos en los terminales.
- En casos de perfiles rígidos, se enfatiza la inspección de soldaduras, la pasivación interior y la renovación de recubrimientos antes de alcanzar 0.05 mm/año de corrosión.

Estos criterios de durabilidad y ciclo de vida se utilizarán como base para cuantificar, en la sección de resultados, el cálculo de costo-beneficio a través de diferentes diseños, de acuerdo con su estrategia de mantenimiento.

2.2.6. Criterios de selección de la tipología de péndolas

La selección de cables de torón flexibles (péndulos) frente a los rígidos (perfiles metálicos) debe determinarse con una evaluación mixta, considerando factores técnicos, económicos y estéticos. Varias investigaciones en la última década han recomendado marcos de decisión multicriterio para considerar estas dimensiones [13].

Se ha determinado cuánta importancia asignar a los criterios técnicos de rigidez, pandeo y fatiga; informaron que el peso de la rigidez axial supera al de la flexión en un 35% cuando el vano libre es mayor de 80 m [18]. Mediante el uso de la lógica difusa para modelar las incertidumbres en los costos de mantenimiento y encontraron que los perfiles rígidos generan calificaciones más estables en el caso de vidas útiles variables. El análisis comparativo de costos del ciclo de vida (LCC) que muestra que, aunque los péndulos rígidos incurren en un 15% más de inversiones iniciales, los costos operativos pueden disminuir hasta un 30% en un período de 50 años [18].

TABLA 6.
Matriz comparativa para la selección de péndolas. Adaptado de [18].

Criterio	Cable torón	Perfil rígido
Rigidez y control de flechas	Adecuado para luces ≤ 50 m; flechas moderadas	Recomendado para luces ≥ 80 m; flechas minimizadas
Estabilidad frente a pandeo	Factor KK crítico	Alta carga crítica; márgenes amplios de esbeltez
Comportamiento dinámico	Baja frecuencia natural; riesgo de resonancias	Alta frecuencia; mejor amortiguamiento
Durabilidad y mantenimiento	Inspección cada 5 años; recubrimientos frecuentes	Inspección cada 3 años; control de soldaduras
Coste inicial	Menor coste de material y montaje	Coste superior de fabricación y montaje
Coste de ciclo de vida	Elevado por mantenimiento recurrente	Optimizado por menor necesidad de intervención

Este cuadro sirve como guía práctica para decidir la tipología más adecuada según la luz del arco, las exigencias de servicio y los recursos disponibles. En función de estos criterios, la fase de modelación y análisis de costos en la sección de resultados confirmará la opción óptima para el puente arco de 100 m de luz.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo y experimental, basado en la generación de 8 modelos de un puente arco de 100 m de luz. Cada modelo presenta una configuración distinta de péndolas, flexibles o rígidas, lo que permite medir con precisión las diferencias en esfuerzos internos, deflexiones y frecuencias de vibración bajo cargas normalizadas (Ver Tabla 7). Mediante simulaciones en RFEM 6, CSI Bridge y SAP2000, se controla sistemáticamente la variable independiente —la tipología de las péndolas—, manteniendo inalteradas el resto de las condiciones geométricas, de material y de carga.

TABLA 7.
Descripción y numeración de modelos simulados. Elaboración propia

Número de Modelo	Configuración de Péndolas	Descripción técnica breve
Modelo 1	Péndolas verticales (tensadas)	Disposición ortogonal con inclinación, sin cruce.
Modelo 2	Péndolas verticales (no tensadas)	Similar al Modelo 1, con ajuste de tensión
Modelo 3	Péndolas verticales flexibles con tubería	Péndolas sin aporte de rigidez lateral

Modelo 4	Péndolas inclinadas rígidas tipo Warren	Disposición diagonal alternada, mejora distribución de carga
Modelo 5	Péndolas cruzadas tipo Nielsen	Cruce simétrico, mayor rigidez lateral
Modelo 6	Péndolas rígidas verticales	Sustitución de tubería por perfiles metálicos verticales
Modelo 7	Péndolas flexibles tipo Network	Disposición cruzada con cables, máxima eficiencia
Modelo 8	Péndolas flexibles con tubería, plano de arco vertical	Similar al Modelo 3, con ajuste de plano de trabajo

Este estudio de laboratorio virtual se complementa con un análisis correlacional. Una vez obtenidos, los datos de esfuerzo y desplazamiento son exportados a Excel para examinar las relaciones estadísticas entre la rigidez de las péndolas y las respuestas estructurales cuantificadas. De este modo, no solo se experimenta con modelos de “tipo ensayo” en un entorno computacional, sino que también se determina la fuerza de asociación entre los parámetros de diseño de las péndolas y el comportamiento global del puente.

En términos de clasificación metodológica, el trabajo es de carácter aplicado. Esto se debe a que incorpora la normativa AASHTO LRFD 2020 y herramientas profesionales de elementos finitos con el fin último de proponer criterios de selección de péndolas para proyectos reales. Su naturaleza comparativa permite extraer conclusiones generalizables para puentes arco metálicos de gran vano, optimizando así aspectos clave como la resistencia, la estabilidad y el ciclo de vida de la estructura.

3.2. Población o muestra

Esta investigación sigue un diseño de caso único replicado en ocho casos estructurales diferentes (una por cada tipo de tirante, ver sección 3.1) en vez de una población estadística. Caso de estudio: puente arco de acero de 100 m de luz modelado en softwares estructurales. Este modelo inicial se repitió con soportes flexibles y rígidos en las mismas condiciones de contorno y carga normalizada. El propósito es la validez comparativa, no se necesitó un muestreo probabilístico. La evaluación de cada configuración en las mismas condiciones garantiza que las ocho réplicas simuladas actúen como "muestras" homogéneas.

De este modo, las diferencias encontradas en los resultados solo se pueden justificar por la variable tipológica de las péndolas. Esta metodología de laboratorio virtual permite controlar por completo el experimento, asegurando su fiabilidad al comparar los esfuerzos internos, desplazamientos y frecuencias de vibración entre los modelos.

3.3. Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender

La hipótesis principal de esta investigación es que la rigidez estructural de las péndolas rígidas produce un mejor comportamiento en esfuerzos internos y máximos desplazamientos que los sistemas flexibles. Esta premisa se operativiza mediante las siguientes hipótesis estadísticas:

- **H₀ (Hipótesis nula):** No existe diferencia significativa en los esfuerzos máximos y deflexiones del puente arco de 100 m entre las configuraciones con péndolas rígidas y flexibles.

- **H₁ (Hipótesis alternativa):** La configuración con péndolas rígidas reduce significativamente los esfuerzos máximos y las deflexiones en comparación con la configuración flexible.

Para su contrastación, se extrajeron los valores pico de esfuerzo axial, cortante, momento flector y deflexión de las envolventes de resultados de los ocho modelos (Anexo IV). El contraste de hipótesis se realizó mediante pruebas t de Student para muestras pareadas, comparando cada modelo rígido con su homólogo flexible en cada variable estructural. Se estableció un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Así, si el valor t calculado superaba el valor crítico para $(n-1) = 7$ grados de libertad, se rechazaba la hipótesis nula (H_0).

Este procedimiento no solo cuantifica la magnitud de las diferencias entre tipologías, sino que también establece su significancia estadística. De este modo, las conclusiones sobre el desempeño comparativo de los sistemas se sustentan en evidencia estadística robusta, más allá de la mera observación de diferencias numéricas.

3.4. Recolección de información

La recolección de datos se realizó a partir de las simulaciones estructurales ejecutadas en softwares de análisis estructural para las ocho configuraciones de péndolas descritas en la sección 3.1. Una vez completados el análisis estático lineal y modal, se exportaron las envolventes de resultados, que incluyen las variables estructurales detalladas en la Tabla 8, para su consolidación en una hoja de cálculo.

Posteriormente, los datos se organizaron con los valores máximos y mínimos registrados cada 5 metros a lo largo de la luz del arco (de 0 m a 100 m). El proceso de interpretación consistió en identificar los picos de esfuerzo y deflexión para

cada modelo, junto con su ubicación exacta en la viga tirante y el arco. Finalmente, para garantizar la trazabilidad se registró sistemáticamente la siguiente información:

- Nombre del modelo simulado (1 a 8)
- Punto de medición (metros desde el arranque del arco)
- Variable estructural
- Valor máximo y mínimo obtenido
- Software de origen y tiempo de registro

TABLA 8.
Variables estructurales registradas. Elaboración propia

Variable Interna	Elemento Medido	Origen del Dato
Fuerza axial	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000
Fuerza cortante V2	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000
Fuerza cortante V3	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000
Momento M2	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000
Momento M3	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000
Torsión	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000
Deflexión	Viga tirante y arco	RFEM 6 / CSI Bridge / SAP2000

La confiabilidad de los datos se aseguró mediante exportaciones directas desde el software de elementos finitos, evitando la transcripción manual. Cada variable fue cotejada para verificar su consistencia, y los archivos digitales se respaldaron para garantizar la integridad y la trazabilidad de toda la información recopilada.

3.5. Procesamiento de la información y análisis estadístico

El procesamiento de datos se realizó en una hoja de cálculo donde se agruparon los valores máximos de cada variable estructural, axial, cortantes V2 y V3, momentos M2 y M3, torsión y deflexión, en intervalos de 5 metros a lo largo del arco. A continuación, se generaron ocho columnas de diferencias para confrontar sistemáticamente cada modelo rígido con su contraparte flexible (1 vs. 6, 2 vs. 5, 3 vs. 4, 7 vs. 8). De este modo, cada fila representó la diferencia puntual entre configuraciones para una variable y posición específicas.

La significancia estadística de estas diferencias se verificó con una prueba t de Student para muestras pareadas, usando una función de análisis estadístico estándar con parámetros de dos colas y varianzas iguales. Se fijó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Para cada par de modelos y cada variable estructural, se obtuvo el valor t calculado y su valor p asociado. Cuando $p < 0.05$, se rechazó la hipótesis nula, concluyendo que la tipología rígida produjo un cambio estadísticamente significativo frente a la flexible.

Adicionalmente, para cada variable se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre los ocho modelos rígidos y los ocho flexibles, con el fin de cuantificar la fuerza de la asociación lineal. Estos coeficientes complementan la prueba t, ya que permiten determinar si los cambios observados en un par de modelos se reproducen de forma consistente en todos los pares analizados. El procesamiento íntegro de los datos y los cálculos estadísticos se documentaron en

una pestaña específica, lo que garantiza la trazabilidad y la reproducibilidad del análisis.

Mediante este procedimiento, no solo se obtienen comparaciones numéricas de esfuerzos y deformaciones, sino que también se valida su relevancia práctica con criterios estadísticos formales, cumpliendo así con los estándares de rigor que establece la normativa AASHTO LRFD 2020 para la justificación de decisiones de diseño.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelación estructural y tipología de puentes

Se realizó la simulación de 8 puentes que presentan configuraciones distintas de péndolas. En la Figura 7 se presentan las imágenes de los modelos simulados y enumerados en base a los descrito en la Tabla 7.

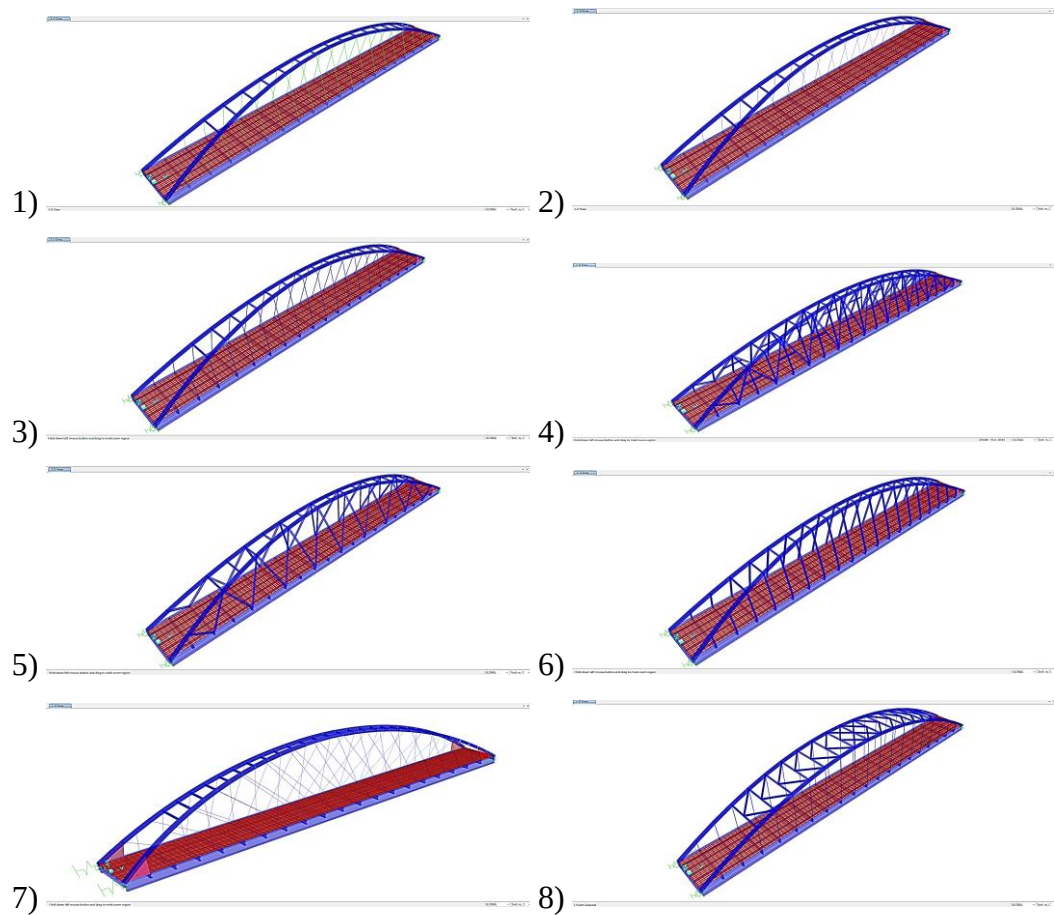


Fig. 7. Tipología de puentes con péndolas rígidos y flexibles.

4.2. Fuerza Axial en la Viga Tirante

La fuerza axial representa el esfuerzo de compresión que el arco transmite al tirante a través de las péndolas. Para cada uno de los ocho modelos, se extrajeron los valores máximo y mínimo de este esfuerzo en la viga tirante. Estos valores se resumen en la Tabla 9.

TABLA 9.
Fuerza axial máxima y mínima en la viga tirante. Elaboración propia

Modelo	Configuración	Máximo (ton)	Ubicación (m)	Mínimo (ton)	Ubicación (m)
1	Tensadas	627,46	5,00	31,15	0,00
2	Torones sin tensar	740,77	5,00	162,73	5,00
3	Tubería 5" ced 40	655,49	25,00	75,05	25,00
4	Rig. tipo Warren	665,47	30,00	50,39	45,00
5	Rig. tipo Nielsen	673,21	35,00	39,95	45,00
6	Rig. verticales	678,35	40,00	39,95	45,00
7	Flex. tipo Network	671,52	60,00	50,39	35,00
8	Tubería sin inclinar	643,94	5,00	43,42	40,00

El Modelo 2 (torones sin tensar) presentó la mayor fuerza axial, con un valor pico de 740,77 ton localizado a los 5,00 m del arranque. Este resultado coincide con la concentración inicial de carga identificada en el análisis estructural. En contraste, el Modelo 7 (configuración Network) registró la menor fuerza axial máxima de 671,52 ton, ubicada a los 60,00 m. Esta diferencia en la magnitud y localización del pico refleja la capacidad del sistema en red para distribuir la compresión de manera más uniforme a lo largo de la luz del puente.

La comparación directa entre estas configuraciones extremas revela una disminución del 9,44 % en la fuerza axial pico al emplear la tipología Network frente a los torones sin tensar. Estos resultados confirman que las configuraciones flexibles de tipo Network atenúan de manera más eficaz la transmisión de carga axial concentrada. La Figura 8 grafica la envolvente de fuerza axial versus la distancia para todos los Modelos:

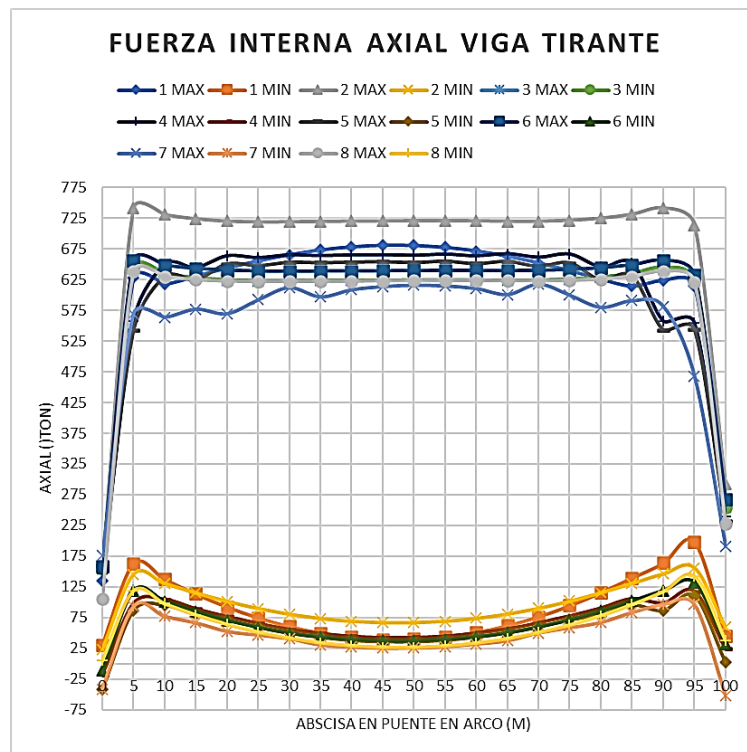


Fig. 8. Envolvente de fuerza axial Elaboración propia

Al centrarse en los modelos 2 y 7, se ilustra visualmente la reducción y el desplazamiento del pico de compresión cuando se emplea la red de péndolas.

4.3. Fuerza Cortante V_2 en la Viga Tirante

La fuerza cortante V_2 representa el esfuerzo de corte que las péndolas transmiten al tirante bajo la acción vertical del arco (Ver Tabla 10). El análisis de los resultados evidencia un comportamiento diferenciado entre las configuraciones:

- El cortante máximo (valor más negativo) se registró en el Modelo 8 (péndolas flexibles de tubería 5" sin inclinar), con un valor de $-208,72$ ton en el apoyo inicial (0,0 m).
- El cortante mínimo (valor más positivo) correspondió al Modelo 6 (péndolas rígidas verticales), con $72,81$ ton en el apoyo opuesto (100,0 m).

TABLA 10.

Valores extremos de cortante V_2 en la viga tirante. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton)	Ubicación (m)
Cortante V_2 Máximo	8	Tubería sin inclinar	$-208,72$	0,0
Cortante V_2 Mínimo	6	Rígidas verticales	72,81	100,0

La Figura 9 ilustra la envolvente de cortante V_2 a lo largo de la luz del puente para todos los modelos. La gráfica destaca la pronunciada concentración de esfuerzos en el arranque para el Modelo 8, en contraste con el desplazamiento de la demanda de corte hacia el extremo opuesto en el Modelo 6.

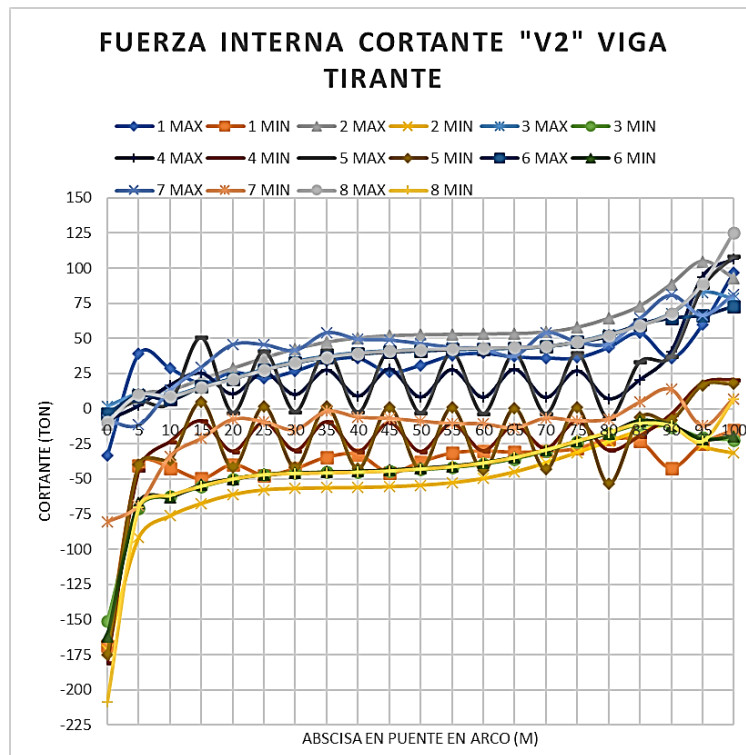


Fig. 9. Envolvente de cortante V_2 en función de la distancia (m). Elaboración propia

La configuración de tubería sin inclinar (Modelo 8) genera un esfuerzo cortante muy intenso y localizado en el apoyo inicial, llegando a duplicar en magnitud al siguiente valor más alto. Este pico se atribuye a la baja rigidez axial de la tubería en el plano vertical, que le impide atenuar eficazmente la carga lateral transferida por el arco. Por el contrario, las péndolas rígidas verticales (Modelo 6) producen un cortante positivo significativo en el extremo opuesto (72,81 ton), lo que indica una redistribución del esfuerzo que contribuye a un equilibrio general de las fuerzas de corte en el tirante. Este comportamiento sugiere que las péndolas rígidas verticales ofrecen una mejor distribución del cortante, mientras que las configuraciones como la tubería sin inclinación pueden requerir refuerzos locales específicos en las zonas de apoyo para manejar las altas concentraciones de esfuerzo.

4.4. Fuerza Cortante V_3 en la Viga Tirante

La fuerza cortante V_3 representa la componente de cizallamiento transversal en el plano vertical longitudinal de la viga tirante (Ver Tabla 11). El análisis de los resultados identificó los siguientes valores extremos:

- El valor máximo de cortante V_3 (más negativo) fue de $-19,14$ ton, registrado en el Modelo 1 (péndolas flexibles tensadas) a los $5,00$ m del arranque.
- El valor mínimo (más positivo) correspondió al Modelo 7 (configuración Network), con $12,13$ ton a los $90,00$ m.

TABLA 11.

Valores extremos de cortante V_2 en la viga tirante. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton)	Ubicación (m)
Cortante V_3 Máximo	1	Flexibles tensadas	$-19,14$	$5,00$
Cortante V_3 Mínimo	7	Flex. tipo Network	$12,13$	$90,00$

La Figura 10 presenta la envolvente de cortante V_3 a lo largo de la luz del puente para todos los modelos.

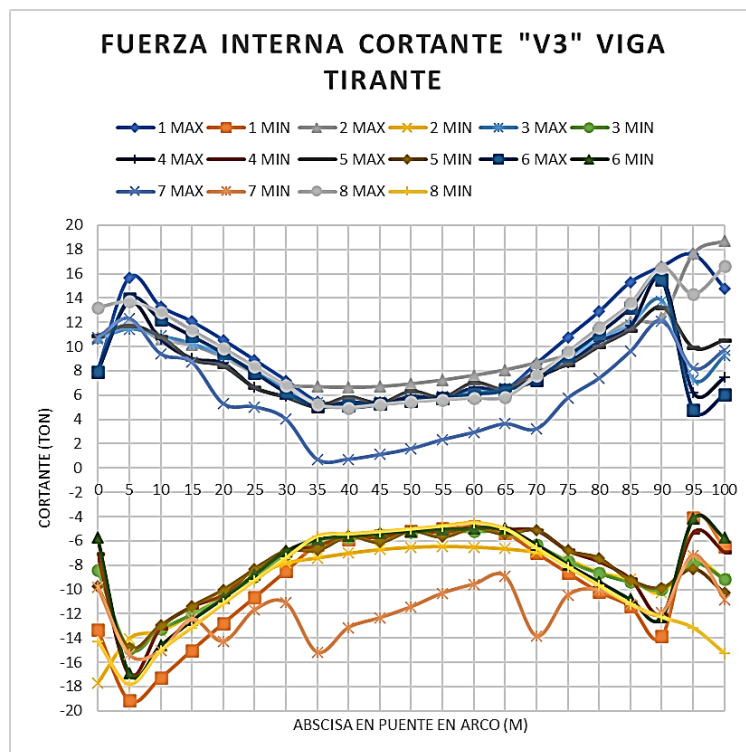


Fig. 10. Envolvente de cortante V_3 en función de la distancia (m). Elaboración propia

La comparación de los resultados revela que las péndolas flexibles tensados (Modelo 1) generan un pico de cortante negativo significativo cerca del apoyo (–19,14 ton), lo que sugiere una capacidad limitada de este sistema para atenuar las cargas transversales en la zona de arranque. Por el contrario, la configuración Network (Modelo 7) produce un esfuerzo cortante positivo de 12,13 ton hacia el final del tramo. Este desplazamiento y cambio en la naturaleza del esfuerzo implican una redistribución más equilibrada de las fuerzas de corte a lo largo del tirante.

Este comportamiento confirma que la geometría en malla cruzada de las péndolas tipo Network favorece una mejor disipación del cortante transversal V_3 , mitigando las concentraciones de esfuerzo en las zonas críticas de apoyo y contribuyendo a una mayor estabilidad global del tirante a lo largo de toda su luz.

4.5. Momento Torsor en la Viga Tirante

El momento torsor en la viga tirante refleja los esfuerzos de giro que actúan sobre el elemento. La Tabla 12 presenta los valores extremos del momento torsor. El análisis de los resultados identificó los siguientes valores extremos:

- El momento torsor máximo (valor más negativo) fue de $-9,10 \text{ ton}\cdot\text{m}$, registrado en el Modelo 7 (configuración Network) a los 35,00 m.
- El momento torsor mínimo (valor más positivo) correspondió al Modelo 6 (péndolas rígidas verticales), con $0,97 \text{ ton}\cdot\text{m}$ en el arranque (0,00 m).

TABLA 12.

Valores extremos de momento torsor en la viga tirante. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton·m)	Ubicación (m)
Momento Torsor Máximo	7	Flex. tipo Network	-9,10	35,00
Momento Torsor Mínimo	6	Rígidas verticales	0,97	0,00

La Figura 11 presenta la atenuación del momento con la configuración Network y su concentración en el extremo cuando se emplea tubería sin inclinar.

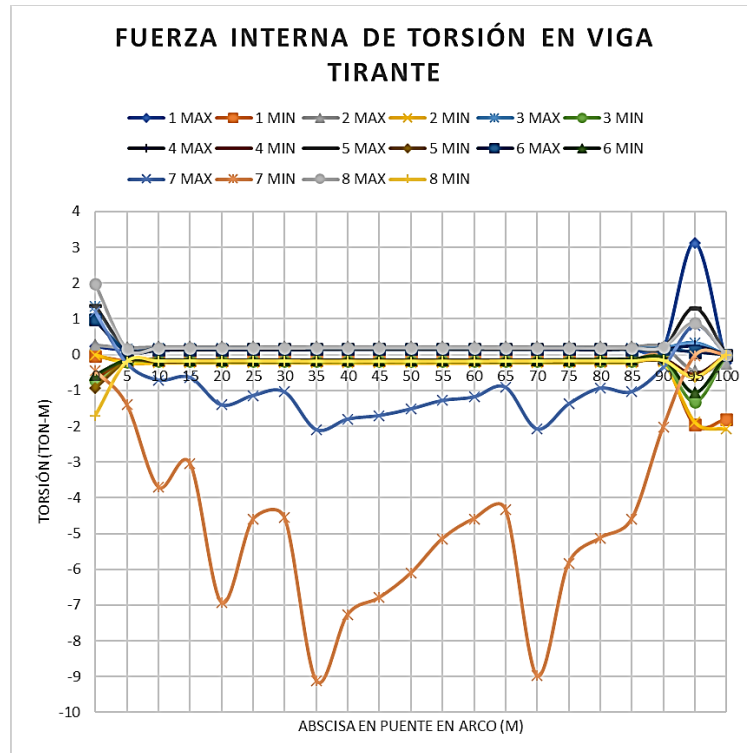


Fig. 11. Gráfica la envolvente de momento torsor para todos los modelos. Elaboración propia

La configuración Network (Modelo 7) introduce un momento torsor negativo significativo en la zona central del vano ($-9,10 \text{ ton}\cdot\text{m}$). Este efecto es consecuencia directa de la interacción diagonal de las péndolas cruzadas, que genera un par torsor contrapuesto en el tirante. Por otro lado, las péndolas rígidas verticales (Modelo 6) prácticamente eliminan la torsión en la zona de apoyo, limitándola a un valor mínimo de $0,97 \text{ ton}\cdot\text{m}$.

Este comportamiento indica una compensación en el desempeño de cada sistema: mientras que las péndolas en red distribuyen de manera más eficaz la carga axial (Sección 4.1), pueden inducir esfuerzos torsores considerables que exigen un diseño específico del tirante para resistirlos. Por el contrario, las péndolas rígidas verticales minimizan estos efectos de torsión, favoreciendo un comportamiento

más estable a costa de transmitir una mayor carga axial concentrada. Esta relación inversa entre la distribución de axiales y la generación de torsión es un criterio fundamental para la selección del sistema de péndolas.

4.6. Momento Flector M_2 en la Viga Tirante

El momento flector M_2 cuantifica el esfuerzo de flexión en el plano vertical del tirante. Los valores extremos obtenidos para este esfuerzo fueron:

- El momento flector máximo (valor más positivo) fue de 78,66 ton·m, registrado en el Modelo 8 (péndolas flexibles de tubería sin inclinar) a los 95,00 m.
- El momento flector mínimo (valor más negativo) correspondió al Modelo 7 (configuración Network), con -36,10 ton·m a los 5,00 m.

TABLA 13.

Valores extremos de momento flector M_2 en la viga tirante. Elaboración propia

Modelo	Configuración	Momento Máximo (ton·m)	Ubicación (m)	Momento Mínimo (ton·m)	Ubicación (m)
1	Tensadas	44,11	5,00	-51,74	5,00
2	Torones sin tensar	144,65	5,00	-412,85	5,00
3	Tubería 5" ced. 40	26,41	10,00	-37,19	10,00

4	Rig. tipo Warren	10,59	35,00	-19,97	35,00
5	Rig. tipo Nielsen	12,03	15,00	-20,95	25,00
6	Rig. verticales	14,01	20,00	-21,31	20,00
7	Flex. tipo Network	19,54	15,00	-27,14	15,00
8	Tubería sin inclinar	78,66	95,00	-51,74	5,00

La Figura 12 grafica la envolvente del momento M_2 para los Modelos 7 y 8, contrastando la distribución de esfuerzos entre ambas configuraciones.

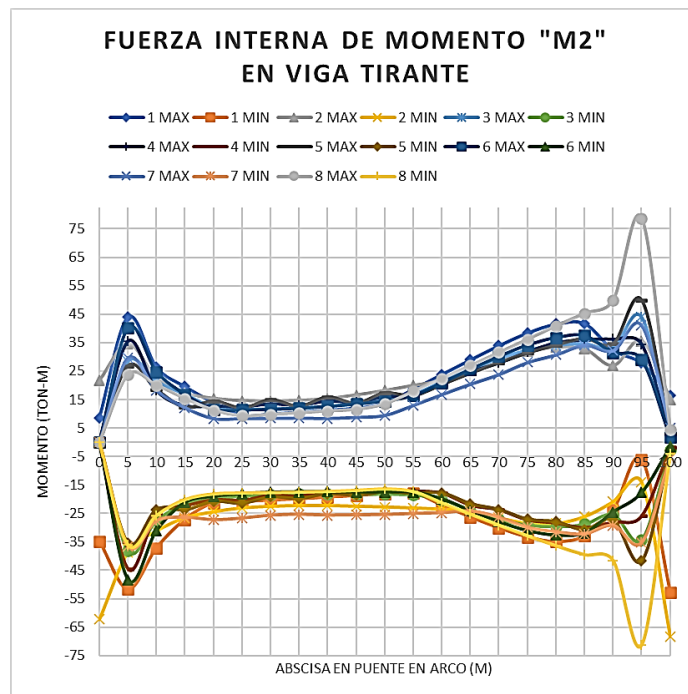


Fig. 12. Gráfica la envolvente de M_2 para todos los modelos. Elaboración propia

El Modelo 8 (tubería sin inclinar) genera un pico de flexión muy elevado en el extremo del vano (78,66 ton·m). Esta concentración de esfuerzo implica mayores demandas de resistencia a la flexión en la viga tirante, requiriendo probablemente una sección estructural más robusta en esa zona. Por el contrario, la configuración Network (Modelo 7) mantiene los valores de momento flector dentro de un rango moderado, con un máximo negativo de -36,10 ton·m cerca del apoyo, lo que representa una reducción de aproximadamente el 51 % en la magnitud del momento máximo absoluto en comparación con el Modelo 8.

Este resultado subraya que, más allá de la rigidez axial, la geometría del sistema de péndolas influye decisivamente en la distribución de momentos flectores. Los sistemas cruzados, como la configuración Network, dispersan las cargas de manera más uniforme a lo largo de la luz del tirante. Por el contrario, configuraciones como la tubería sin inclinar tienden a concentrar los picos de momento en los extremos, lo que puede derivar en un diseño menos eficiente de la viga tirante.

4.7. Momento Flector M_3 en la Viga Tirante

El momento flector M_3 cuantifica el esfuerzo de flexión en el plano vertical transversal del tirante. En la Tabla 14 se presentan los valores extremos de M_3 para los ocho modelos simulados.

TABLA 14.
Momentos flectores M_3 extremos en la viga tirante. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton·m)	Ubicación (m)
M_3 Máximo	2	Torones sin tensar	888,63	30,00
M_3 Mínimo	5	Rig. tipo Nielsen	85,32	85,00

La Figura 13 muestra la envolvente del momento flector M_3 a lo largo de la luz del puente para todos los modelos.

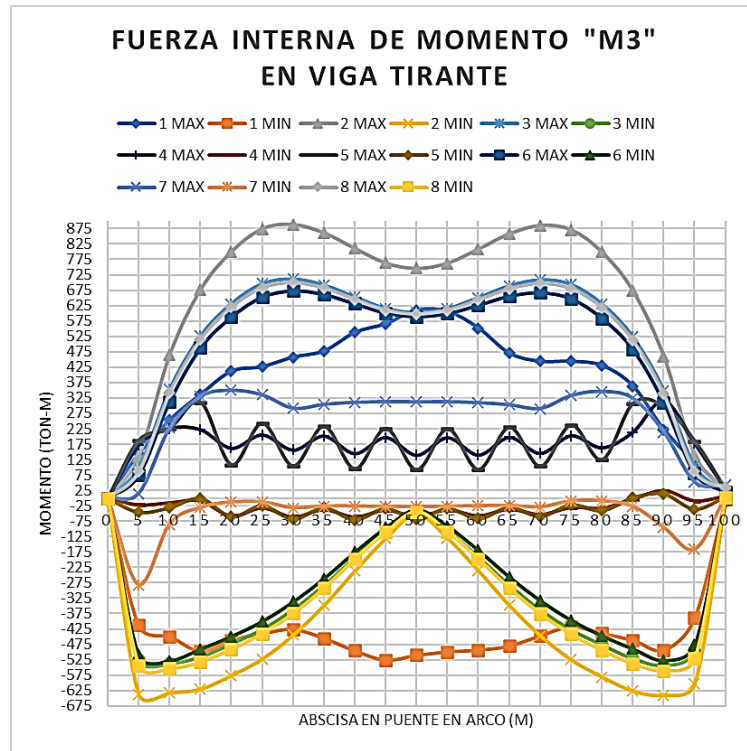


Fig. 13. Gráfica la envolvente de M_3 para todos los modelos. Elaboración propia

La comparación de los resultados revela una diferencia significativa en la magnitud y distribución del esfuerzo. El Modelo 2 (torones sin tensar) concentra el momento flector más elevado, con 888,63 ton·m en la zona central del vano (30,00 m). Este pico se atribuye a la combinación de la rigidez axial de las péndolas y la concentración de carga en la parte media de la estructura.

Por el contrario, las configuraciones rígidas demuestran una notable eficacia para atenuar este efecto. El Modelo 5 (péndolas rígidas tipo Nielsen) reduce el valor pico a 85,32 ton·m, desplazando la demanda flexional hacia el extremo del vano (85,00 m). Este comportamiento es consistente con el del Modelo 4 (tipo Warren),

que registra un valor muy similar de 87,01 ton·m en una ubicación cercana (90,00 m), lo que confirma la capacidad de los sistemas rígidos para distribuir de manera más uniforme el momento flector M_3 .

Este análisis demuestra que, más allá de la rigidez axial, la geometría y el tipo de tirante influyen decisivamente en el comportamiento flexional. Los resultados respaldan la selección de sistemas rígidos cuando el objetivo de diseño sea controlar los picos de flexión y lograr una distribución de esfuerzos más favorable en puentes arco de gran luz.

4.8. Flecha Máxima en la Viga Tirante

La flecha o deflexión vertical de la viga tirante bajo cargas permanentes se evaluó registrando los desplazamientos máximo y mínimo a lo largo de su luz. Los valores extremos se resumen en la Tabla 15.

TABLA 15.
Flechas extremas en la viga tirante. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Flecha (m)	Ubicación (m)
Flecha Máxima	2	Torones sin tensar	-0,159820	50,00
Flecha Mínima	1	Tensadas	-0,103748	50,00

La Figura 14 presenta la envolvente de deflexión a lo largo de la luz del puente para los ocho modelos, destacando la diferencia entre las configuraciones que generan la máxima y la mínima flecha.

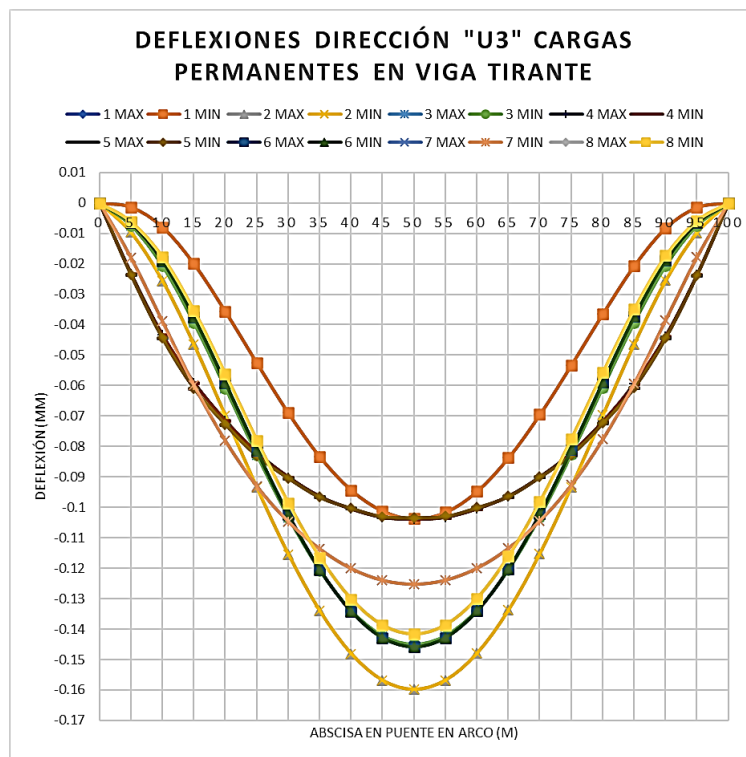


Fig. 14. Gráfica la envolvente de U_3 para todos los modelos. Elaboración propia

Tanto las péndolas de torones sin tensar (Modelo 2) como los tensados (Modelo 1) presentan su máxima deformación en el centro de la luz (50,00 m). Sin embargo, la magnitud de la flecha difiere significativamente: el Modelo 2 alcanza un valor de $-0,159820$ m, lo que representa un 54 % más de deflexión que el Modelo 1 ($-0,103748$ m).

Esta notable diferencia se atribuye directamente a la menor rigidez flexional efectiva del sistema con torones sin tensar. El resultado cuantifica de manera contundente cómo la tipología del tirante influye en el control de las deformaciones. Este hallazgo refuerza la necesidad de considerar la relación entre la rigidez estructural y otros factores, como la posible disipación de energía, durante la selección del sistema de péndolas para puentes arco de gran luz, ya que existe una compensación inherente entre estos aspectos del desempeño.

4.9. Momento Torsor en el Arco

El momento torsor cuantifica el esfuerzo que tiende a girar la sección del arco alrededor de su eje longitudinal bajo la acción de cargas excéntricas. Los valores extremos, considerando las envolventes de resistencia, se presentan en la Tabla 16.

TABLA 16.
Momentos torsor extremos en el arco. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton·m)	Ubicación (m)
Momento Torsor Máximo	6	Rígidas verticales	43,22	100,00
Momento Torsor Mínimo	8	Flex. de tubería 5" sin inclinación	16,61	40,00

La Figura 15 ilustra la envolvente del momento torsor a lo largo del arco para los ocho modelos evaluados.

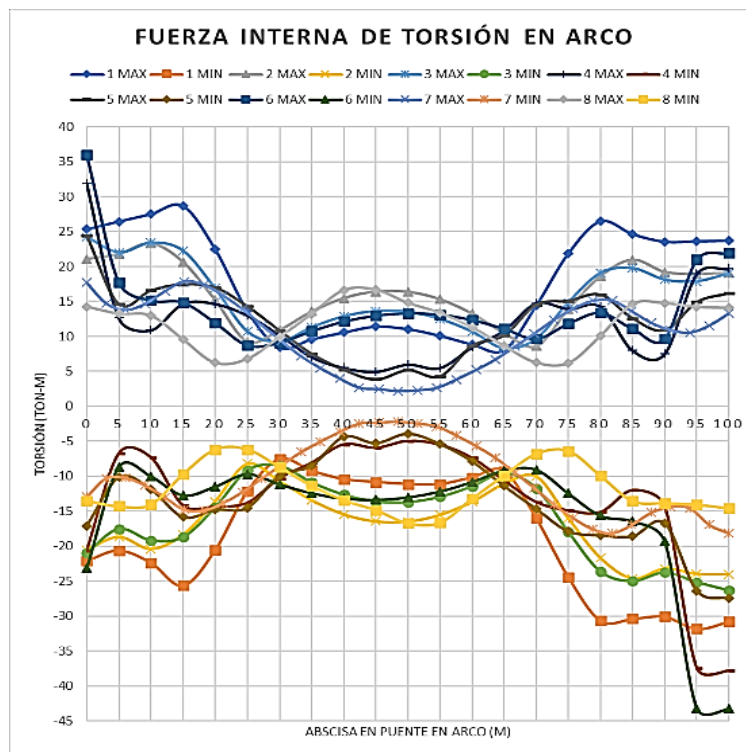


Fig. 15. Gráfica la envolvente de Momento Torsor en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

La configuración de péndolas rígidas verticales (Modelo 6) induce el momento torsor más elevado en el arco, con un valor de 43,22 ton·m en el apoyo final (100,00 m). Este efecto se debe a la alta rigidez flexional del sistema, que restringe los desplazamientos y transmite las cargas de manera más directa, generando una mayor demanda torsional en los apoyos.

En contraste, las péndolas flexibles de tubería sin inclinar (Modelo 8) reducen el valor pico a 16,61 ton·m, ubicado a los 40,00 m. Esta atenuación del 60% aproximadamente se atribuye a la flexibilidad del sistema, que le permite absorber desplazamientos rotacionales y disipar la torsión a lo largo de la luz del arco, en lugar de concentrarla en los extremos.

Este comportamiento destaca una compensación fundamental: las péndolas más flexibles atenúan significativamente los momentos torsores en el arco, mientras

que las configuraciones rígidas, si bien pueden mejorar el control de deflexiones, transfieren una demanda torsional considerable a las zonas de apoyo, lo que puede requerir un mayor diseño de la sección del arco y de los anclajes para garantizar la estabilidad global.

4.10. Fuerza Axial en el Arco

La fuerza axial en el arco representa el esfuerzo de compresión principal que el tirante transmite a través de las péndolas. Los valores extremos de compresión para las ocho configuraciones se presentan en la Tabla 17.

TABLA 17.
Fuerza axial extrema en el arco. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton)	Ubicación (m)
Fuerza Axial Máxima (Compresión)	2	Torones sin tensar	-892,59	5,00
Fuerza Axial Mínima (Compresión)	7	Flex. tipo Network	-734,25	42,42

La Figura 16 presenta la envolvente de fuerza axial a lo largo de la luz del arco para los ocho modelos.

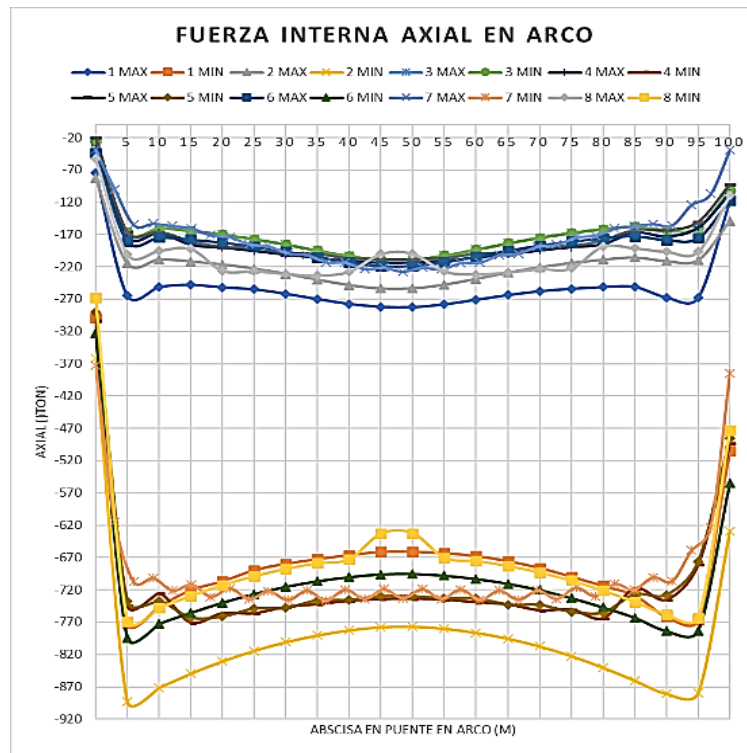


Fig. 16. Gráfica la envolvente de Fuerza Axial en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

El Modelo 2 (torones sin tensar) concentra la máxima compresión axial en el arco, con un valor de $-892,59$ ton localizado muy cerca del apoyo, a los $5,00$ m. Este pico de esfuerzo es consecuencia de la alta rigidez axial de las péndolas en la zona inicial del vano, que transfiere la carga de manera más directa y concentrada.

Por el contrario, la tipología Network (Modelo 7) atenúa significativamente esta carga, registrando una compresión máxima de $-734,25$ ton. Es notable que este valor no ocurre en el apoyo, sino que se desplaza hacia la zona media del arco ($42,42$ m). Este comportamiento demuestra la capacidad del sistema en red para redistribuir la compresión a lo largo del arco, homogenizando los esfuerzos.

La diferencia del $17,7\%$ en la compresión máxima entre ambas configuraciones es sustancial. Estos resultados evidencian cómo la geometría y la rigidez de las péndolas modifican fundamentalmente el patrón de transmisión de cargas al

arco. Este hallazgo es crucial para el dimensionamiento de la sección del arco, ya que una compresión más uniforme y menor beneficia la estabilidad global y reduce el riesgo de pandeo local, orientando la selección hacia sistemas que optimicen este comportamiento.

4.11. Fuerza Cortante V_2 en el Arco

La fuerza cortante V_2 en el arco representa el esfuerzo de corte perpendicular al eje longitudinal del elemento, generado por la acción vertical del tirante a través de las péndolas. El análisis de los resultados identificó los valores extremos mostrados en la Tabla 18.

TABLA 18.
Valores extremos de cortante V_2 en el arco. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Cortante V_2 (ton)	Ubicación (m)
Cortante V_2 Mínimo	8	Flex. de tubería sin inclinar	-208,72	0,00
Cortante V_2 Máximo	6	Rígidas verticales	72,81	100,00

La Figura 17 muestra la envolvente de cortante V_2 a lo largo de la luz del arco para las ocho configuraciones.

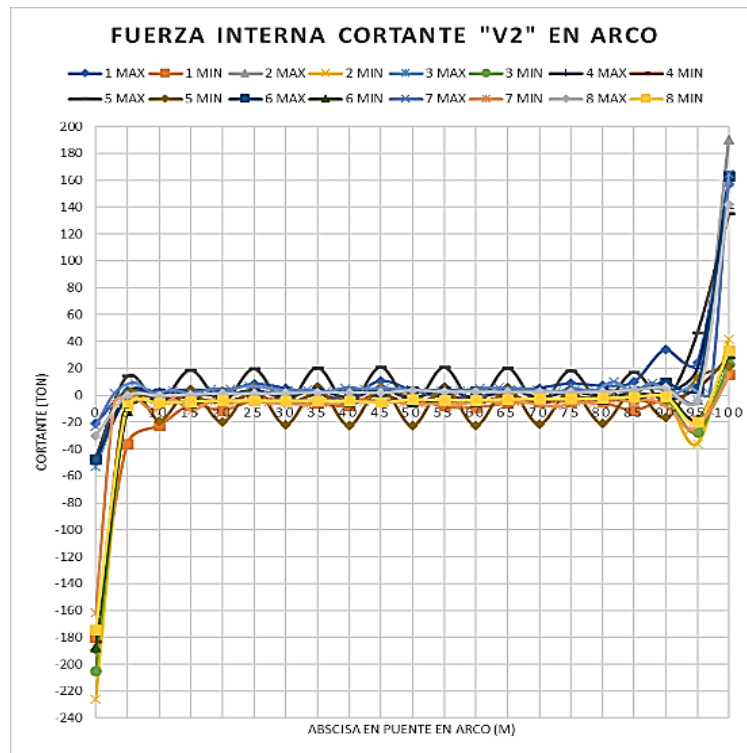


Fig. 17. Gráfica la envolvente de V_2 en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

El análisis revela un comportamiento contrastante entre las configuraciones flexibles y rígidas. El Modelo 8 (péndolas flexibles de tubería sin inclinar) produce el valor de cortante negativo más extremo (-208,72 ton) en el arranque del arco (0,00 m), indicando una fuerte concentración de esfuerzos en esta zona crítica. Por el contrario, el Modelo 6 (péndolas rígidas verticales) genera el cortante positivo máximo (72,81 ton) en el apoyo opuesto (100,00 m), demostrando su capacidad para desplazar y redistribuir los esfuerzos cortantes a lo largo del arco. Este comportamiento diferencial indica que las geometrías rígidas mejoran significativamente la distribución del cortante V_2 en el arco, evitando concentraciones peligrosas cerca de los apoyos y creando un patrón de esfuerzos más equilibrado. Esta característica es particularmente ventajosa para la estabilidad estructural, ya que reduce las demandas críticas en las zonas de conexión del arco.

4.12. Fuerza Cortante V_3 en el Arco

La fuerza cortante V_3 representa el esfuerzo de corte transversal en la sección del arco, actuando perpendicularmente a su eje longitudinal. Los valores extremos para el modelo de péndolas Tensadas (Modelo 1), correspondientes a la envolvente de resistencia, se presentan en la Tabla 19.

TABLA 19.
Valores extremos de cortante V_3 en el arco. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Cortante V_3 (ton)	Ubicación (m)
Cortante V_3 Máximo	1	Tensadas	157,26	100,00
Cortante V_3 Mínimo	1	Tensadas	-20,86	0,00

La Figura 18 muestra la envolvente completa de cortante V_3 a lo largo del arco para las ocho tipologías de péndolas.

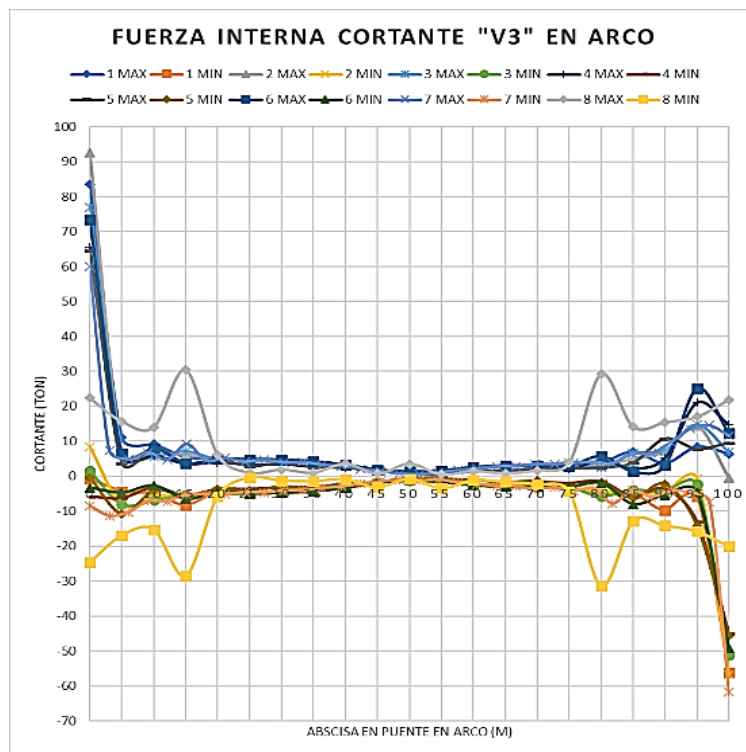


Fig. 18. Gráfica la envolvente de V_3 en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

El análisis del Modelo 1 (péndolas tensadas) revela que esta configuración concentra los esfuerzos cortantes transversales en los extremos del arco. En el apoyo opuesto (100,00 m), se registra el valor máximo de 157,26 ton, mientras que en el arranque (0,00 m) se presenta el valor negativo más significativo de -20,86 ton.

Este patrón se atribuye a la alta rigidez axial del sistema de péndolas tensadas, que limita su capacidad para redistribuir los esfuerzos de corte de manera flexible a lo largo del arco. En consecuencia, las cargas se transmiten de manera más directa hacia los apoyos, generando picos de cortante en estas zonas críticas.

Al comparar con otras geometrías, se observa que configuraciones más flexibles son capaces de desplazar y atenuar estos picos de cortante. Este comportamiento refuerza la conclusión de que las péndolas tensadas, si bien pueden ofrecer ventajas

en otros aspectos, no atenúan eficazmente los esfuerzos cortantes transversales en el arco, concentrando la demanda en los extremos de la estructura.

4.13. Momento Flector M_2 en el Arco

El momento flector M_2 en el arco cuantifica el esfuerzo de flexión en el plano vertical, generado por las cargas transmitidas a través de las péndolas. A partir del análisis de las envolventes de resistencia, se identificaron los valores extremos mostrados en la Tabla 20.

TABLA 20.
Momentos flectores M_2 extremos en el arco. Elaboración propia

Variable	Valor (ton·m)	Ubicación (m)	Modelo	Configuración
M_2 Máximo (Positivo)	91,68	100,00	1	Tensadas
M_2 Mínimo (Negativo)	-69,19	100,00	6	Rígidas verticales

La Figura 19 muestra la variación del momento flector M_2 a lo largo de la luz del arco para las ocho configuraciones.

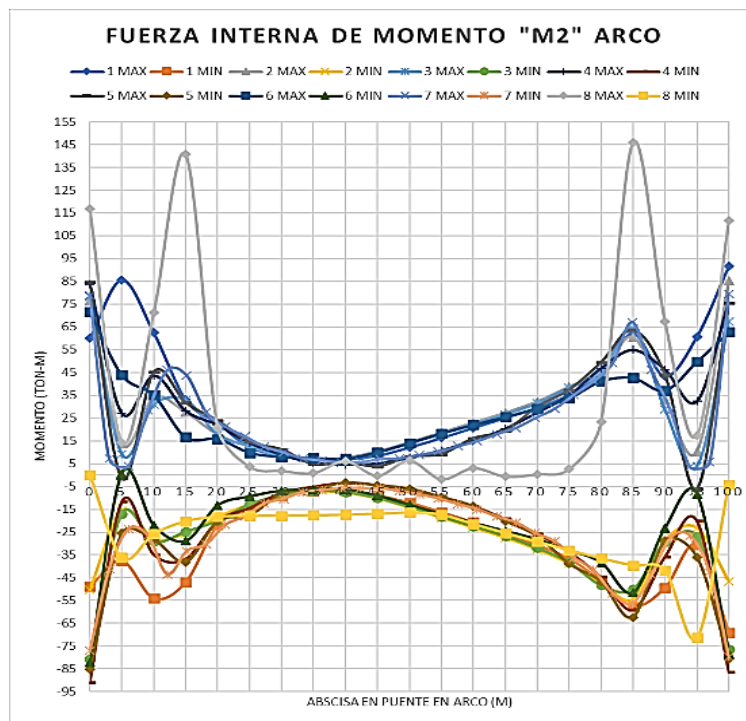


Fig. 19. Gráfica la envolvente de M_2 en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

El análisis revela que el apoyo final del arco (100,00 m) es una zona crítica para la flexión, concentrando los valores extremos para ambas tipologías. Las péndolas tensadas (Modelo 1) generan el momento flector positivo más alto en este punto, con 91,68 ton·m. Este efecto se debe a la rigidez axial concentrada que caracteriza a esta configuración en el extremo del vano.

Por el contrario, las péndolas rígidas verticales (Modelo 6) inducen el momento flector negativo más intenso en la misma ubicación, con -69,19 ton·m. La rigidez de este sistema restringe los desplazamientos, impidiendo una disipación más distribuida del esfuerzo flexional y conduciendo a esta concentración de momento negativo.

El hecho de que ambas configuraciones, a pesar de su naturaleza opuesta, presenten sus valores pico en la misma ubicación es significativo. Esto indica que

la zona del apoyo final del arco es inherentemente crítica para el diseño a flexión, independientemente del sistema de péndolas seleccionadas. Por lo tanto, el refuerzo de esta sección debe ser una consideración primordial, y su diseño específico dependerá de si se prevé un momento positivo o negativo dominante, según la tipología elegida.

4.14. Momento Flector M_3 en el Arco

El momento flector M_3 en el arco cuantifica el esfuerzo de flexión en el plano horizontal, generado por las cargas transmitidas desde el tirante. Los valores extremos identificados se presentan en la Tabla 21.

TABLA 21.
Momentos flectores M_3 extremos en el arco. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton·m)	Ubicación (m)
M_3 Máximo	2	Flex. tipo Torones sin tensar	85,57	5,00
M_3 Mínimo	3	Flex. Tubería 5" ced. 40	-54,08	10,00

La Figura 20 muestra la envolvente del momento flector M_3 a lo largo de la luz del arco para las ocho configuraciones evaluadas.

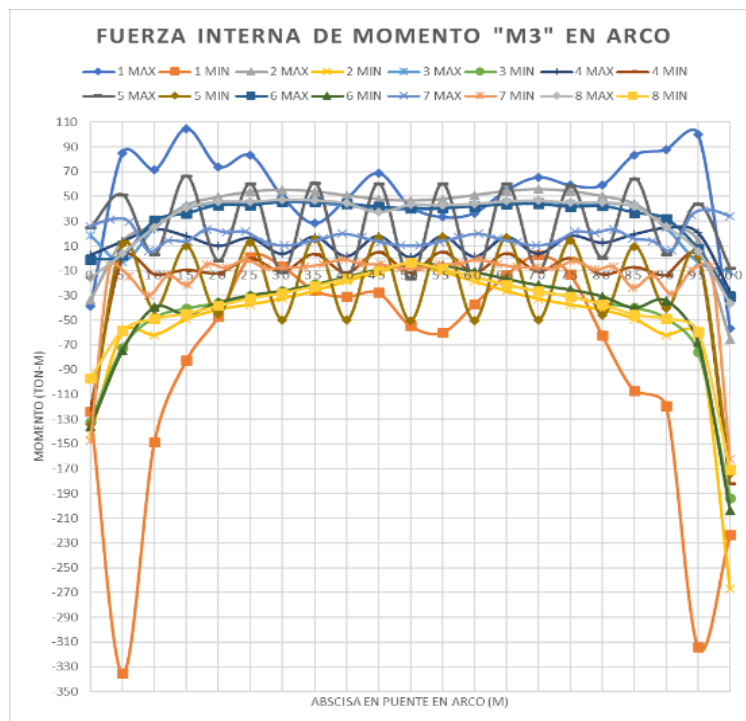


Fig. 20. Gráfica la envolvente de M_3 en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

El análisis revela que los momentos flectores M_3 más significativos se concentran en el primer tramo del arco. El Modelo 2 (péndolas flexibles de torones sin tensor) genera el momento positivo máximo de 85,57 ton·m a los 5,00 m del arranque. Este comportamiento se atribuye a la combinación de la rigidez del sistema y la concentración de carga en la zona inicial del vano.

Por el contrario, el Modelo 3 (péndolas flexibles de tubería 5") produce el momento negativo más acentuado de -54,08 ton·m a los 10,00 m. La menor rigidez flexional de esta configuración limita su capacidad para distribuir eficientemente los esfuerzos, resultando en esta concentración de flexión negativa.

La proximidad de ambos valores extremos (5,00 m y 10,00 m) destaca que la región cercana a los apoyos del arco es particularmente crítica para la flexión horizontal. Estos resultados demuestran la influencia determinante de la geometría y rigidez de las péndolas en la magnitud y distribución de los momentos flectores

M₃. El conocimiento de estos patrones orienta el refuerzo específico de la sección del arco en las zonas críticas identificadas, optimizando así el diseño estructural.

4.15. Flecha Máxima en el Arco ante Cargas Permanentes

La flecha o deflexión vertical del arco bajo cargas permanentes se evaluó a partir de las envolventes de resistencia. Los valores extremos de desplazamiento para los ocho modelos se resumen en la Tabla 22.

TABLA 22.

Flechas extremas en el arco. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Flecha (m)	Ubicación (m)
Flecha Máxima	6	Rígidas verticales	-0,145115	50,00
Flecha Mínima	7	Flex. tipo Network	-0,005517	5,00

La Figura 21 muestra la envolvente de deflexión a lo largo de la luz del arco para todas las configuraciones, contrastando el comportamiento de los Modelos 6 y 7.

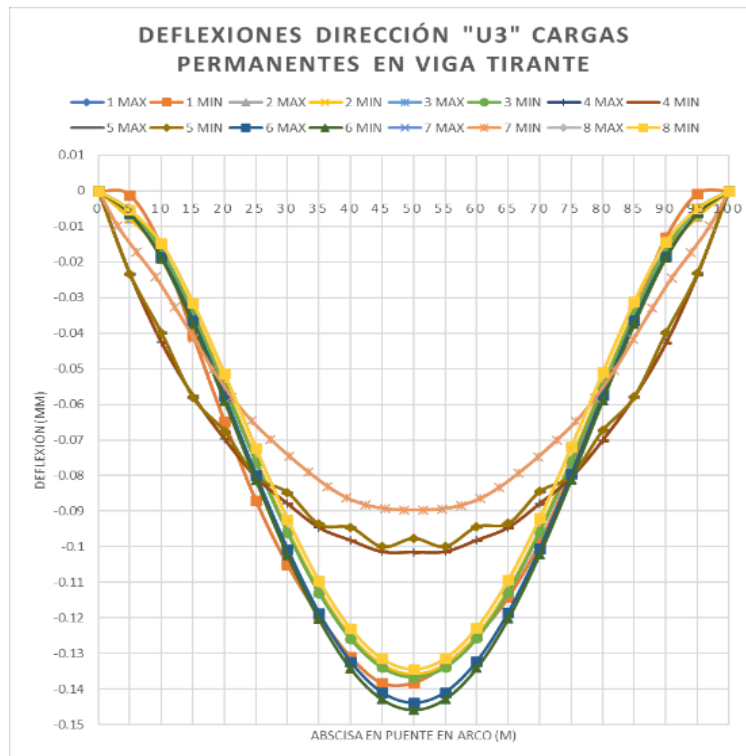


Fig. 21. Gráfica la envolvente de deflexión en el arco para todos los modelos. Elaboración propia

Los resultados revelan una diferencia dramática en el comportamiento de deformación del arco según la tipología de péndolas. La configuración de péndolas rígidas verticales (Modelo 6) produce la mayor flecha, con un valor de $-0,145115$ m en el centro de la luz (50,00 m). Este efecto se atribuye a la alta rigidez transversal del sistema, que concentra la deformación en la zona central del vano. Por el contrario, la tipología Network (Modelo 7) atenúa casi completamente la flecha, registrando un valor mínimo de $-0,005517$ m cerca del apoyo (5,00 m). Este desempeño excepcional es resultado de la redistribución cruzada de cargas característica de esta geometría, que disipa las deformaciones a lo largo del arco en lugar de concentrarlas en un punto específico.

La diferencia absoluta de 0,139598 m representa una reducción del 96.2% en la flecha máxima al emplear la configuración Network frente a las péndolas rígidas verticales. Esta diferencia tan significativa confirma que la geometría de las péndolas influye decisivamente en el control de deformaciones del arco. Para objetivos de diseño donde el estado de servicio (limitación de flechas) y la longevidad de la estructura son prioritarios, la configuración Network demuestra una clara superioridad sobre los sistemas rígidos verticales.

4.16. Fuerza Axial en las Péndolas

La fuerza axial en las péndolas cuantifica el esfuerzo de compresión que estos elementos transmiten desde el tirante hacia el arco. Los valores extremos identificados para las ocho configuraciones se presentan en la Tabla 23.

TABLA 23.
Fuerza axial extrema en las péndolas. Elaboración propia

Variable	Modelo	Configuración	Valor (ton)	Ubicación (m)
Fuerza Axial Máxima	1	Tensadas	70,83	90,00
Fuerza Axial Mínima	8	Tubería 5" sin inclinar	20,70	5,00

La Figura 22 ilustra la distribución de la fuerza axial a lo largo de la luz del arco para los ocho modelos de péndolas.

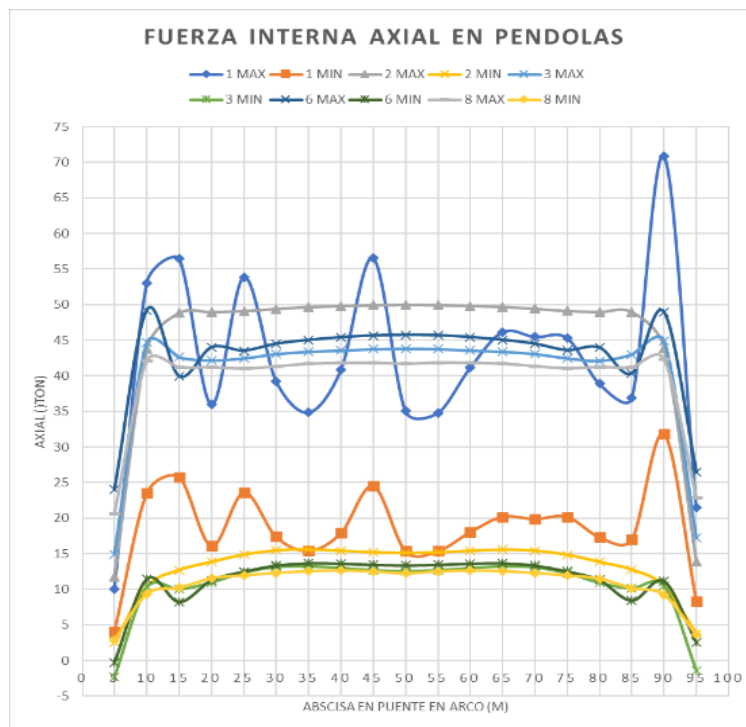


Fig. 22. Gráfica la envolvente de fuerza axial en las péndolas para todos los modelos. Elaboración propia

La comparación evidencia una diferencia sustancial en la magnitud de la carga axial transmitida por las péndolas según su tipología. Las péndolas tensadas (Modelo 1) concentran la máxima compresión axial, con un valor de 70,83 ton localizado cerca del extremo del vano (90,00 m). Este comportamiento es característico de sistemas con alta rigidez y baja esbeltez efectiva, que transfieren las cargas de manera más directa.

En el extremo opuesto, las péndolas flexibles de tubería sin inclinar (Modelo 8) transmiten la carga axial más baja, con 20,70 ton en la zona de arranque (5,00 m). La flexibilidad de este sistema le permite absorber y redistribuir parte del esfuerzo, atenuando la transmisión directa de compresión hacia el arco.

La diferencia de 50,13 ton implica una reducción del 70,8 % de la fuerza axial máxima al usar la configuración flexible en vez de la tensada. Esta diferencia tan

grande verifica la dependencia de la magnitud de las fuerzas internas con la forma de las péndolas. El descubrimiento proporciona información para elegir el sistema: los cables tensados son apropiados para arreglos que exigen rigidez, pero los flexibles reducen en gran medida las fuerzas axiales, lo que puede resultar en miembros más esbeltos y un diseño más eficiente.

4.17. Resumen de variables analizadas

TABLA 24.

Resumen de variables analizadas. Elaboración propia.

Variable Interna	Modelo	Resultado	Descripción del resultado
Fuerza axial en la viga tirante	2	Máxima de <i>740,77 ton</i> localizado a los <i>5,00 m</i>	La comparación directa entre estas configuraciones extremas revela una disminución del 9,44 % en la fuerza axial pico al emplear la tipología Network frente a los torones sin tensor.
	7	Máxima de <i>671,52 ton</i> ubicada a los <i>60,00 m.</i>	
Fuerza cortante V2 en la viga tirante	8	Valor mínimo de <i>-208,72 ton</i> en el apoyo inicial <i>0,0 m</i>	Este comportamiento sugiere que las péndolas rígidas verticales ofrecen una mejor distribución del cortante, mientras que las

	6	Valor máximo de <i>72,81 ton</i> en el apoyo opuesto <i>100,0 m</i>	configuraciones como la tubería sin inclinación pueden requerir refuerzos locales específicos en las zonas de apoyo para manejar las altas concentraciones de esfuerzo.
Fuerza cortante V3 en la viga tirante	1	Valor mínimo de <i>-19,14 ton</i> ubicado a los <i>5,00 m</i> .	Este comportamiento confirma que la geometría en malla cruzada de las péndolas tipo Network favorece una mejor disipación del cortante transversal V ₃ , mitigando las concentraciones de esfuerzo en las zonas críticas de apoyo y contribuyendo a una mayor estabilidad global del tirante a lo largo de toda su luz.
	7	Valor máximo de <i>12,13 ton</i> ubicado a los <i>90,00 m</i> .	
Momento torsor en la viga tirante	7	Valor negativo de <i>-9,10 ton·m</i> Ubicado en <i>30,00 m</i>	La configuración Network del Modelo 7 introduce un momento torsor negativo significativo en la zona central del vano. Este efecto es consecuencia directa de la interacción diagonal de las péndolas cruzadas, que genera un par torsor contrapuesto en el tirante. Por otro lado, las péndolas rígidas verticales del Modelo 6 prácticamente eliminan la torsión en la zona de apoyo.
	6	Valor positivo de <i>0,97 ton·m</i> Ubicado en <i>0,00 m</i>	

Momento M2 en la viga tirante	8	Valor positivo de <i>78,66 ton·m.</i> Ubicado en <i>95,00 m</i>	Este resultado subraya que, más allá de la rigidez axial, la geometría del sistema de péndolas influye decisivamente en la distribución de momentos flectores. Los sistemas cruzados, como la configuración Network, dispersan las cargas de manera más uniforme a lo largo de la luz del tirante. Por el contrario, configuraciones como la tubería sin inclinar tienden a concentrar los picos de momento en los extremos, lo que puede derivar en un diseño menos eficiente de la viga tirante.
	7	Valor negativo de <i>-36,10 ton·</i> Ubicado al final del arco <i>5,00 m</i>	
Momento M3 en la viga tirante	2	Valor máximo de <i>888,63 ton·m</i> a los <i>30,00 m</i>	Este análisis demuestra que, más allá de la rigidez axial, la geometría y el tipo de tirante influyen decisivamente en el comportamiento flexional. Los resultados respaldan la selección de sistemas rígidos cuando el objetivo de diseño sea controlar los picos de flexión y lograr una distribución de esfuerzos más favorable en puentes arco de gran luz.
	5	Valor mínimo de <i>85,32 ton·m</i> a los <i>85,00 m.</i>	

Flecha máxima en la viga tirante	2	Valor de $-0,159820\text{ m}$ a los $50,00\text{ m}$	Esta notable diferencia se atribuye directamente a la menor rigidez flexional efectiva del sistema con torones sin tensar. El resultado cuantifica de manera contundente cómo la tipología del tirante influye en el control de las deformaciones. Este hallazgo refuerza la necesidad de considerar la relación entre la rigidez estructural y otros factores, como la posible disipación de energía, durante la selección del sistema de péndolas para puentes arco de gran luz, ya que existe una compensación inherente entre estos aspectos del desempeño.
	1	Valor de $-0,103748\text{ m}$ a los $50,00\text{ m}$	
Momento torsor en el arco	6	Valor máximo de $43,22\text{ ton}\cdot\text{m}$ a los $100,00\text{ m}$	Este comportamiento destaca una compensación fundamental: las péndolas más flexibles atenúan significativamente los momentos torsores en el arco, mientras que las configuraciones rígidas, si bien

	8	Valor mínimo de <i>16,61 ton·m</i> a los <i>40,00 m.</i>	pueden mejorar el control de deflexiones, transfieren una demanda torsional considerable a las zonas de apoyo, lo que puede requerir un mayor diseño de la sección del arco y de los anclajes para garantizar la estabilidad global.
Fuerza axial en el arco	2	Valor mínimo de <i>-892,59 ton</i> ubicado a los <i>5,00 m.</i>	La diferencia del 17.7% en la compresión máxima entre ambas configuraciones es sustancial. Estos resultados evidencian cómo la geometría y la rigidez de las péndolas modifican fundamentalmente el patrón de transmisión de cargas al arco. Este hallazgo es crucial para el dimensionamiento de la sección del arco, ya que una compresión más uniforme y menor beneficia la estabilidad global y reduce el riesgo de pandeo local, orientando la selección hacia sistemas que optimicen este comportamiento.
	7	Valor máximo de <i>-734,25 ton</i> ubicado a los <i>90,00 m.</i>	

Fuerza cortante V2 en el arco	8	Valor mínimo de $-208,72 \text{ ton}$ ubicado a los $0,00 \text{ m}$.	Este comportamiento diferencial indica que las geometrías rígidas mejoran significativamente la distribución del cortante V_2 en el arco, evitando concentraciones peligrosas cerca de los apoyos y creando un patrón de esfuerzos más equilibrado. Esta característica es particularmente ventajosa para la estabilidad estructural, ya que reduce las demandas críticas en las zonas de conexión del arco.
	6	Valor máximo de $72,81 \text{ ton}$ ubicado a los $100,00 \text{ m}$.	
Fuerza cortante V3 en el arco	1	En el apoyo opuesto $100,00 \text{ m}$ valor máximo de $157,26 \text{ ton}$ Y en el arranque $(0,00 \text{ m})$ valor mínimo de $-20,86 \text{ ton}$.	Este patrón se atribuye a la alta rigidez axial del sistema, que limita su capacidad para redistribuir los esfuerzos de corte de manera flexible a lo largo del arco. En consecuencia, las cargas se transmiten de manera más directa hacia los apoyos, generando picos de cortante en estas zonas críticas.

Momento M2 en el arco	1	Valor de <i>91,68 ton·m.</i> Ubicado al final del arco <i>100,00 m</i>	El hecho de que ambas configuraciones, a pesar de su naturaleza opuesta, presenten sus valores pico en la misma ubicación es significativo. Esto indica que la zona del apoyo final del arco es inherentemente crítica para el diseño a flexión, independientemente del sistema de péndolas seleccionado. Por lo tanto, el refuerzo de esta sección debe ser una consideración primordial, y su diseño específico dependerá de si se prevé un momento positivo o negativo dominante, según la tipología elegida.
	6	Valor de <i>-69,19.</i> Ubicado al final del arco <i>100,00 m</i>	
Momento M3 en el arco	2	Valor máximo de <i>85,57 ton·m</i> a los <i>5,00 m</i>	La proximidad de ambos valores extremos (5,00 m y 10,00 m) destaca que la región cercana a los apoyos del arco es particularmente crítica para la flexión horizontal. Estos resultados demuestran la influencia determinante de la

	3	Valor mínimo de $-54,08 \text{ ton}\cdot\text{m}$ a los $10,00 \text{ m}$.	geometría y rigidez de las péndolas en la magnitud y distribución de los momentos flectores M_3 . El conocimiento de estos patrones orienta el refuerzo específico de la sección del arco en las zonas críticas identificadas, optimizando así el diseño estructural.
Flecha máxima en el arco ante cargas permanentes	6	Valor mínimo de $-0,145115 \text{ ton}$ ubicado a los $50,00 \text{ m}$.	Los resultados revelan una diferencia dramática en el comportamiento de deformaciones del arco según la tipología de péndolas. La diferencia absoluta de $0,139598 \text{ m}$ representa una reducción del 96.2% en la flecha máxima al emplear la configuración Network
	7	Valor máximo de $-0,005517 \text{ ton}$ ubicado a los $5,00 \text{ m}$.	frente a las péndolas rígidos verticales. Para objetivos de diseño donde el estado de servicio (limitación de flechas) y la longevidad de la estructura son prioritarios, la configuración Network demuestra una clara superioridad sobre los sistemas rígidos verticales.

Fuerza Axial en las Péndolas	1	Valor máximo de <i>70,83 ton</i> a los <i>90,00 m</i>	La diferencia de 50,13 ton implica una reducción del 70,8 % de la fuerza axial máxima al usar la configuración flexible en vez de la tensada. Esta diferencia tan grande verifica la dependencia de la magnitud de las fuerzas internas con la forma de las péndolas. El descubrimiento proporciona información para elegir el sistema: los cables tensados son apropiados para arreglos que exigen rigidez, pero los flexibles reducen en gran medida las fuerzas axiales, lo que puede resultar en miembros más esbeltos y un diseño más eficiente.
	8	Valor mínimo de <i>20,70 ton</i> a los <i>5,00 m.</i>	

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA, ANEXOS.

5.1. Conclusiones

En el estudio se observa el comportamiento estructural de un puente de arco metálico de 100 m de luz, comprobando que la forma de las péndolas influye de manera significativa y cuantificable en los elementos que componen el puente. La configuración reticulada (péndolas rígidas) supera en comportamiento mecánico a los sistemas flexibles, verificado con análisis estático, dinámico y estadístico.

El diseño estructural en base a cargas de diseño y modelado en software de elementos finitos arrojó 8 posibles configuraciones. Este procedimiento aisló la variable de interés en condiciones de contorno y de carga normalizadas, lo que aseguró la comparabilidad entre sistemas de péndolas. Esta replicación sistemática en un ambiente virtual de laboratorio posibilitó manipular y controlar todas las variables y definir las condiciones para una comparación directa.

La comparación y análisis de los valores expuestos en las tablas correspondientes al capítulo 4 de este documento, muestra que las péndolas flexibles en malla mejoran el comportamiento global del puente. Se reduce en 9.44% la fuerza axial máxima del arco se disminuye en 96.2% la flecha vertical y se incrementa en 236.23% el período fundamental, disminuyendo el cortante basal en 65.5%. Las pruebas estadísticas confirman que estas diferencias son significativas ($p < 0.05$),

comprobando la hipótesis de que la rigidez de las péndolas influye en el comportamiento estructural.

5.2. Recomendaciones

1. Profundización en el Análisis de Fatiga y Comportamiento No Lineal

Dado que los resultados demuestran una clara superioridad de las péndolas rígidas bajo cargas estáticas, se recomienda investigar su desempeño a largo plazo. Un análisis de fatiga bajo ciclos de carga variable permitiría evaluar la vida útil de cada tipología y determinar si la ganancia en rigidez compensa potenciales fenómenos de figuración. Complementariamente, un análisis no lineal de vibraciones forzadas por tráfico o viento revelaría el comportamiento en condiciones operativas más extremas.

2. Implementación de un Análisis de Ciclo de Vida (LCC) para la Toma de Decisiones

Para transformar los hallazgos técnicos en una herramienta de gestión, se recomienda desarrollar un análisis de costo de ciclo de vida. Este análisis debe cuantificar, en un horizonte de 50 años, la relación entre el mayor costo inicial de las péndolas rígidas y los ahorros en inspección, mantenimiento y menor interrupción del servicio, demostrando así su viabilidad económica y no solo estructural.

3. Desarrollo de un Protocolo de Durabilidad y Monitoreo

Con el fin de garantizar que la capacidad estructural de las péndolas se mantenga, se recomienda crear un protocolo de durabilidad específico. Este debe incluir especificaciones técnicas para recubrimientos anticorrosión, un modelo predictivo

de pérdida de sección y un plan de inspecciones mediante técnicas no destructivas (ultrasonido, endoscopía), asegurando la integridad a lo largo de la vida útil de la estructura.

4. Validación Experimental mediante un Proyecto Piloto o Modelo Físico

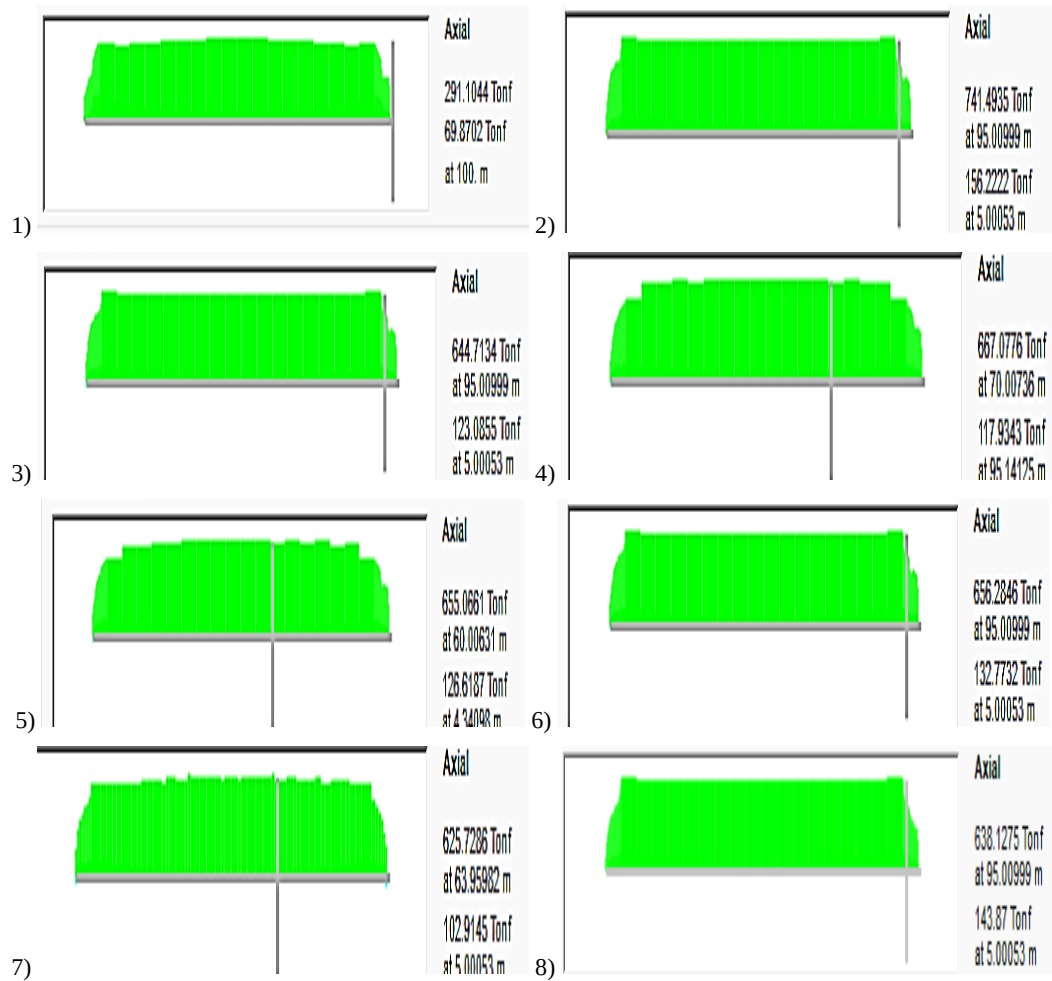
Para superar la limitación inherente del modelado computacional y facilitar la transferencia al sector productivo, se recomienda la validación experimental de los resultados. La instrumentación de un tramo piloto en un proyecto real o de un modelo a escala reducida con sensores de deformación y acelerómetros permitiría contrastar las predicciones de rigidez y respuesta dinámica, consolidando la confiabilidad de la metodología propuesta.

5.3. Bibliografía

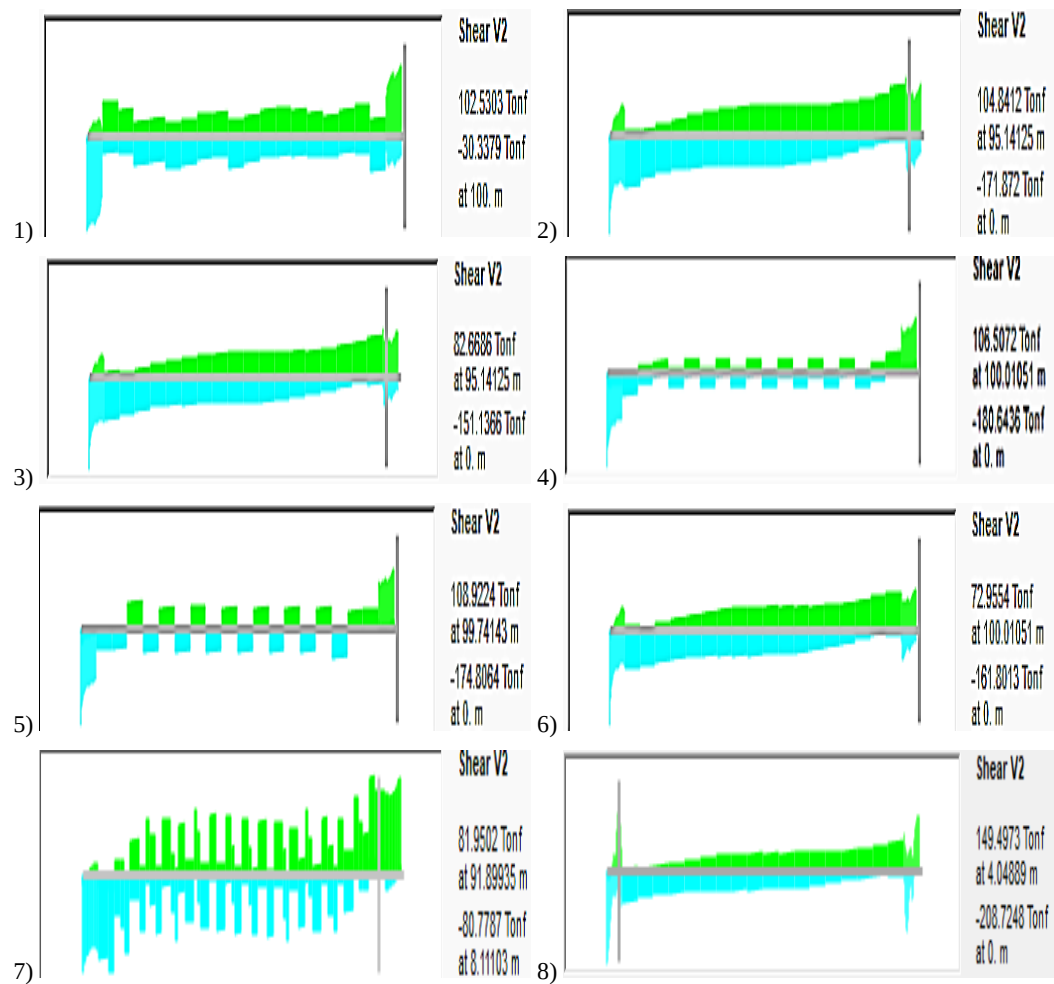
- [1] S. Patil y A. Shiyekar, «Numerical assessment of buckling loads in cable and rigid hanger systems,» *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, n° 4, pp. 567-578, 2022.
- [2] L. Zhang, H. Wu y X. Li, «Corrosion performance of protective coatings on steel cables and box sections,» *Materials and Corrosion*, vol. 74, n° 5, pp. 550-561, 2023.
- [3] R. Žilėnaitė, «Influencia de la rigidez flexional de péndolas en la estabilidad de puentes arco,» *International Journal of Structural Engineering*, vol. 15, n° 2, pp. 123-134, 2021.
- [4] J. Wang y Q. Li, «Buckling optimization of slender steel hangers in arch bridges,» *Steel and Composite Structures*, vol. 45, n° 3, pp. 333-346, 2023.
- [5] RFEM 6 User Manual, Karlsruhe, Germany: Dlubal Software, 2024.
- [6] M. Gallegos, «Desempeño sísmico de nudos en pórticos de acero a momento con columnas tubulares considerando efectos bidireccionales,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2017.
- [7] A. Patil y M. Shiyekar, «Analytical Study of Steel Arch Bridge,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, n° 10, 2023.
- [8] Y. Zhang, L. Wang, Y. Nong y 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. 7, n° 15, 2023.
- [9] K. Zhang, D. Li, X. Xue y F. Teng, «Symmetry,» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, vol. 5, n° 177, 2024.
- [10] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th ed., Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [11] L. Joquera y M. García, «Optimización del número de péndolas rígidas en puentes arco de luz media,» *Engineering Structures*, vol. 30, pp. 205-215, 2020.
- [12] Y. Chen, «Adequacy of AASHTO LRFD criteria in global stability assessment of arch bridges,» *Journal of Bridge Research*, vol. 12, n° 1, pp. 30-44, 2021.
- [13] T. Silva y P. Costa, «Influence of cable pretension on vibration characteristics of arch bridge hangers,» *Journal of Structural Dynamics*, vol. 14, n° 2, pp. 76-88, 2024.
- [14] S. Kumar, P. Mehta y R. Iyer, «Comparative fatigue behavior of steel cables and rigid hangers in arch bridges,» *Structural Engineering International*, vol. 33, n° 1, pp. 15-24, 2023.
- [15] H. Rivera y D. López, «Evaluación de amortiguamiento en sistemas de péndolas rígidas para puentes,» *Revista Ecuatoriana de Ingeniería*, vol. 10, n° 3, pp. 89-102, 2022.

- [16] A. Singh y R. Patel, «Dynamic response of bridge hangers: modeling and simulation,» *International Journal of Bridge Engineering*, vol. 8, n° 4, pp. 210-222, 2020.
- [17] R. Hernández, «Mantenimiento y gestión de fatiga en puentes con sistemas de péndolas,» *Revista de Mantenimiento Estructural*, vol. 5, n° 1, pp. 10-25, 2024.
- [18] M. Santos, C. Pérez y R. Vega, «Integrated dynamic and stability analysis of hybrid hanger systems in long-span arch bridges,» *Bridge Engineering*, vol. 29, n° 1, pp. 100-114, 2024.
- [19] S. Žilėnaitė, «Comparative Analysis of the Buckling Factor of the Steel Arch Bridges,» *Engineering Structures and Technologies*, vol. 1, n° 11, 2019.
- [20] C. Reinoso, «Modelación estructural de puentes arco con péndolas: comportamiento rígido y flexible,» Loja, Ecuador, 2023.
- [21] B. Novak y D. Ivanov, «Service life prediction of steel hangers under cyclic loading,» *Journal of Bridge Maintenance*, vol. 1, n° 2, pp. 5-17, 2022.
- [22] F. Montes, «Respuesta dinámica de péndolas suspendidas bajo excitaciones de viento y tráfico,» Cuenca, Ecuador, 2021.
- [23] G. Martínez, «Impacto de imperfecciones geométricas en la carga crítica de puentes arco,» Guayaquil, Ecuador, 2020.
- [24] A. López, «Desarrollo de modelos numéricos en RFEM 6 para análisis de pandeo en arcos,» Ambato, Ecuador, 2023.
- [25] Z. Liu, Z. Zhang y Y. Li, «Lateral Stability of Network Arch Bridge,» *Journal of Bridge Engineering*, vol. 26, n° 6, 2021.
- [26] P. Jácome, «Análisis comparativo de rigidez y pandeo en arcos metálicos de gran luz,» Ambato, Ecuador, 2022.
- [27] P. García, L. Ramírez y A. Torres, «Fatiga en soldaduras de perfiles estructurales: un estudio experimental,» *Revista de Ingeniería Civil*, vol. 14, n° 1, pp. 45-59, 2021.
- [28] J. Garcia y J. Joquera, «Improving the Structural Behavior of Tied-Arch Bridges by Doubling the Set of Hangers,» *Applied Sciences*, 2020.
- [29] J. Fernández, «Efecto de la longitud libre de pandeo en perfiles rígidos y cables pretensados,» *Revista de Mecánica Estructural*, vol. 9, n° 2, pp. 50-63, 2022.
- [30] SAP2000 v24.1 User Manual, Walnut Creek, CA: Computers and Structures, Inc., 2024.
- [31] CSI Bridge User Manual, Walnut Creek, CA: Computers and Structures, Inc., 2024.
- [32] ASTM A416/A416M-21, Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

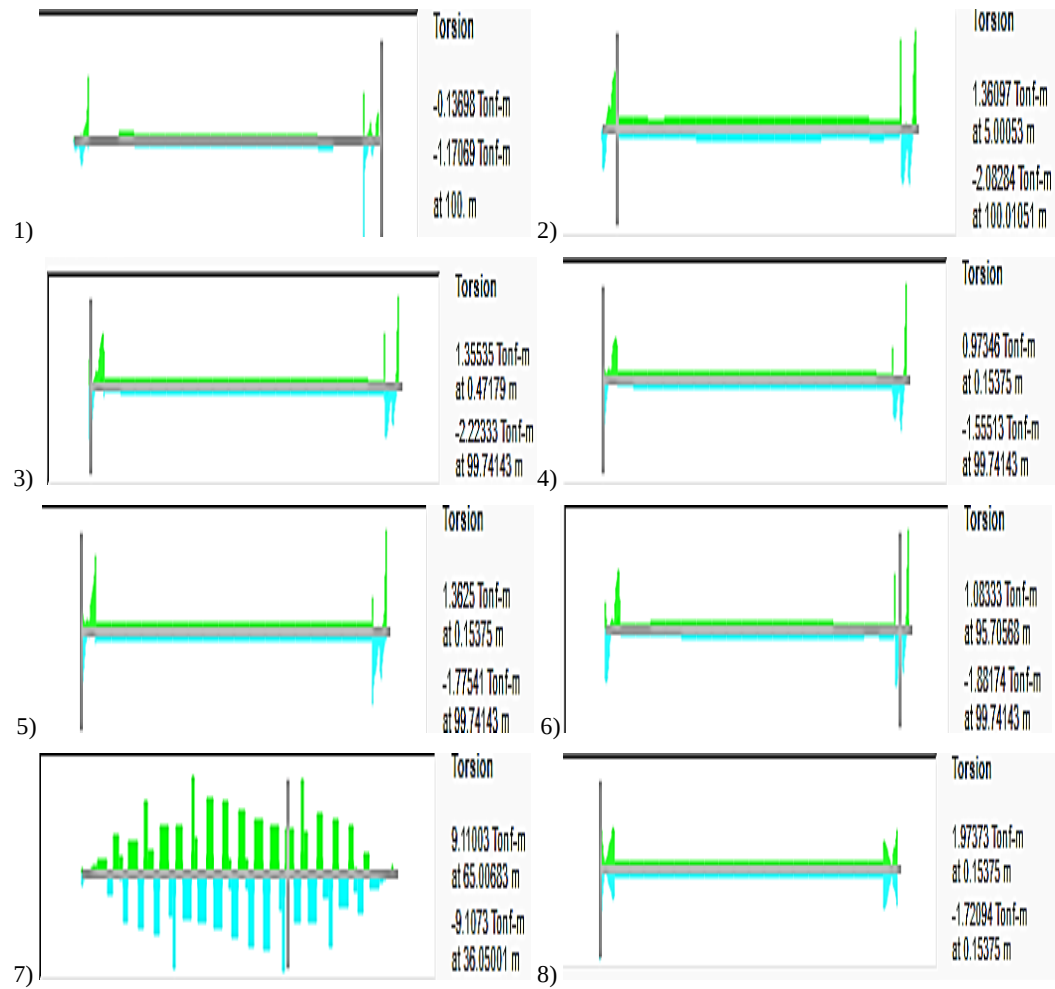
5.4. Anexos



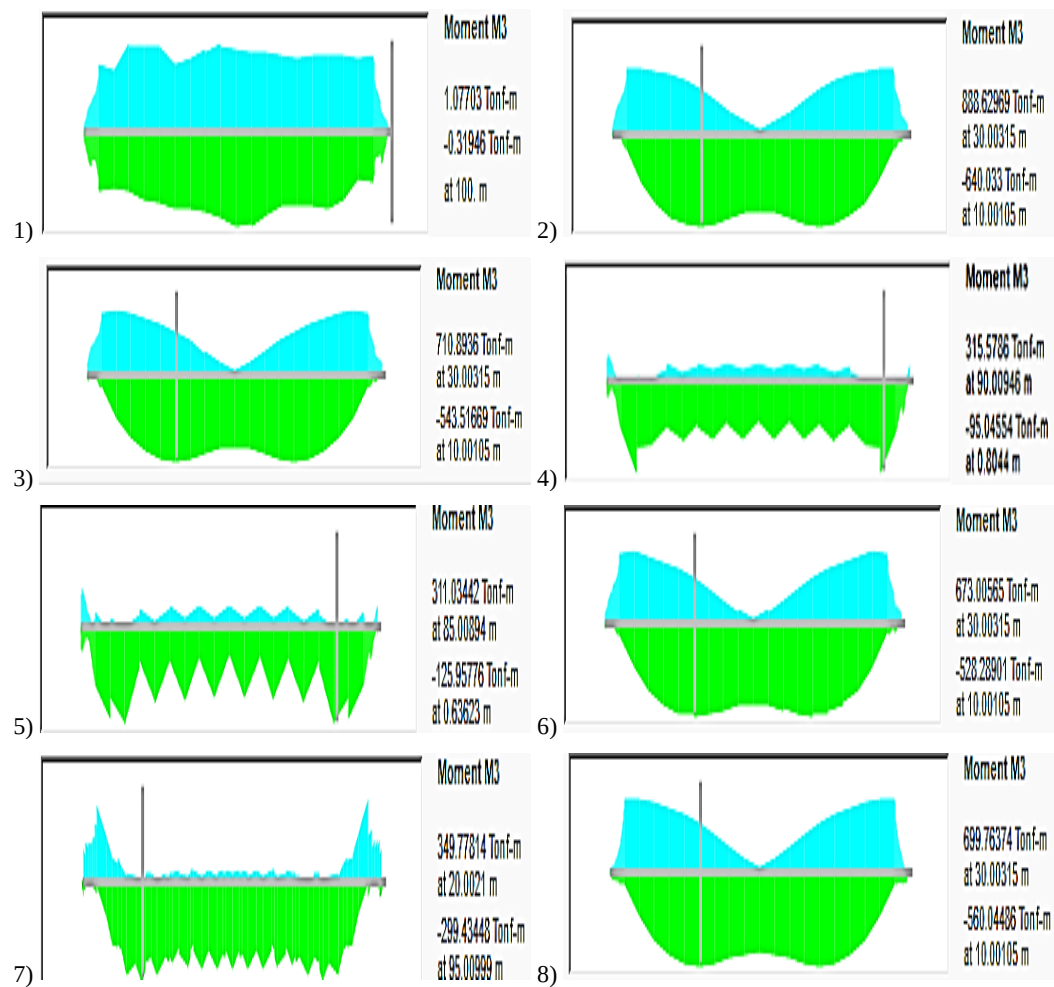
Anexo 1. Gráficos de fuerza axial Modelos 2 y 7. Elaboración propia



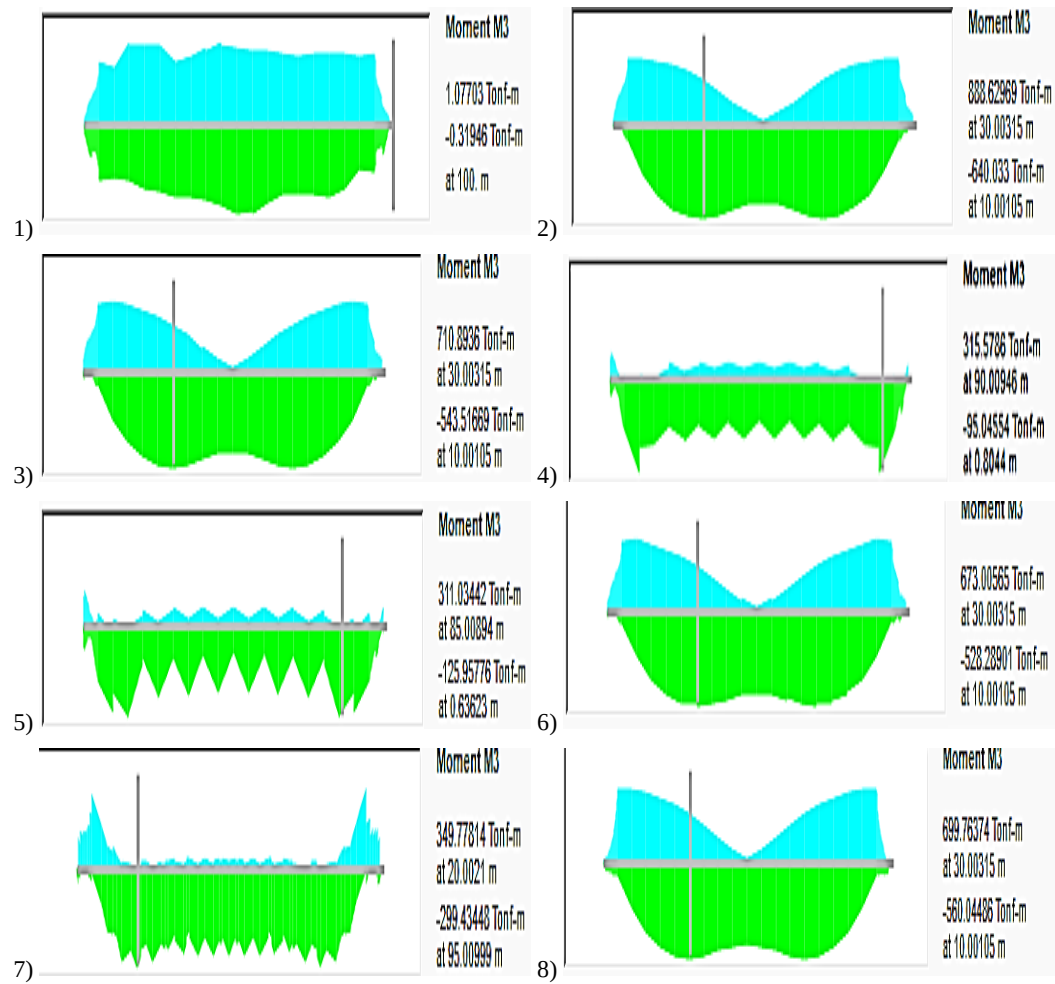
Anexo 2. Gráficos de cortante V_2 en función de la distancia (m). Elaboración propia



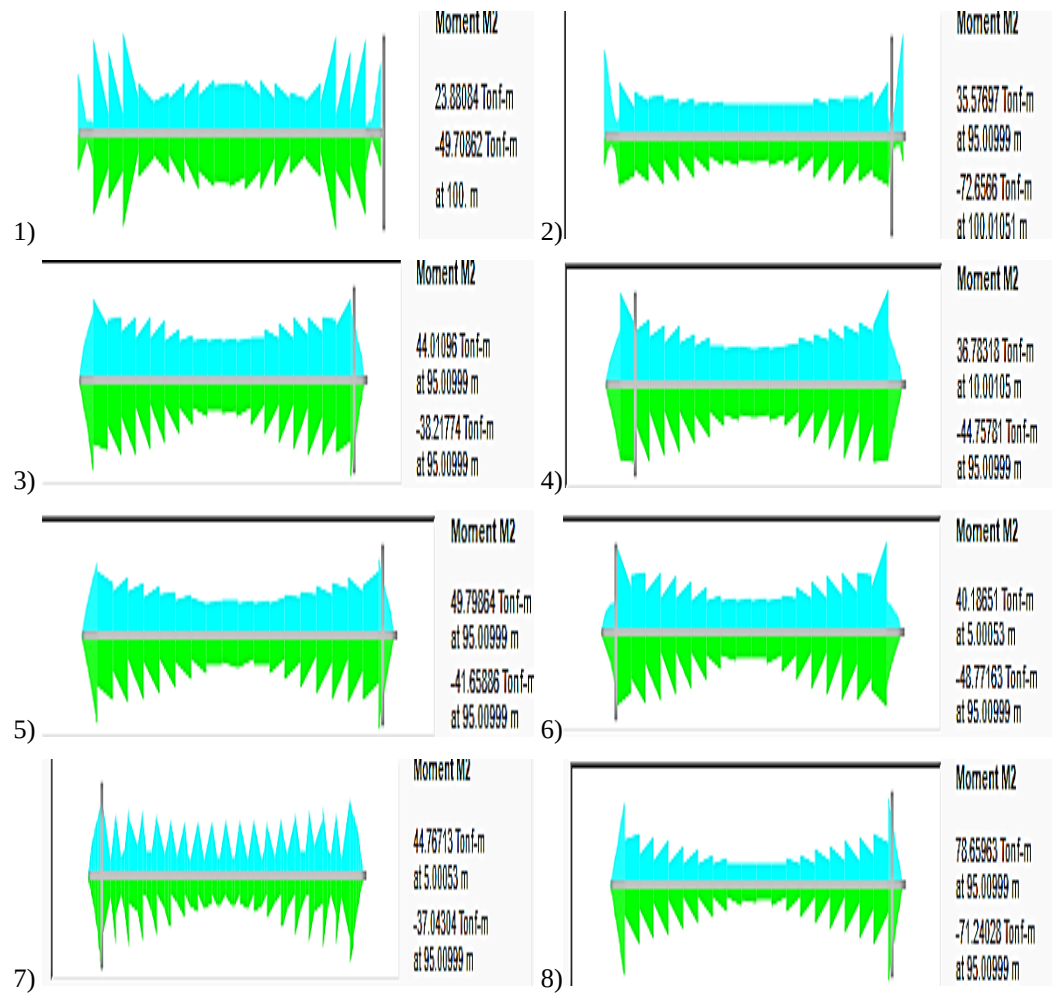
Anexo 3. Gráficos de cortante V_3 en función de la distancia (m). Elaboración propia



Anexo 4. Gráficos de momento torsor para todos los modelos. Elaboración propia



Anexo 5. Gráficos de M_2 para todos los modelos. Elaboración propia



Anexo 6. Gráficos de M_3 para todos los modelos. elaboración propia