



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v7i13esesepsept.0393>

METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE UN PUENTE COLGANTE SUSPENSION BRIDGE CALCULATION METHODOLOGY

Marcillo-Merino Gery Lorenzo ¹; Cordero-Garces Manuel Octavio ²;
Delgado-Mendoza Kevin Alexander ³

¹ Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Técnicas. Jipijapa, Ecuador. Correo: gery.marcillo@unesum.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5583-0042>

² Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Técnicas. Jipijapa, Ecuador. Correo: manuel.cordero391@gmail.com.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4709-5874>

³ Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Técnicas. Jipijapa, Ecuador. Correo: ideltaarts@gmail.com.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-1501-1553>

Resumen

Este documento aborda la metodología de cálculo de un puente colgante, presentando un enfoque integral que combina aspectos teóricos y prácticos para optimizar el diseño y la construcción de estas estructuras icónicas en la ingeniería civil. Los puentes colgantes requieren una cuidadosa planificación y análisis para garantizar su seguridad, durabilidad y eficiencia. La metodología propuesta se basa en una combinación de métodos analíticos y numéricos, que permiten a los ingenieros modelar con precisión los complejos comportamientos estáticos y dinámicos de un puente colgante bajo diversas condiciones de carga y entorno. El artículo destaca la importancia de considerar factores cruciales como la geometría del puente, las propiedades de los materiales utilizados, las cargas esperadas. La metodología propuesta no solo se enfoca en la etapa de diseño, sino que también abarca la construcción y el monitoreo continuo, brindando una aproximación integral que aborda todo el ciclo de vida del puente. Este enfoque metodológico tiene un impacto significativo en la ingeniería civil al permitir la creación de puentes colgantes más seguros, eficientes y sostenibles. Los resultados de este estudio tienen la capacidad de influir en futuros diseños de puentes colgantes al proporcionar directrices fundamentales respaldadas por análisis rigurosos.

Palabras claves: Diseño estructural, Puentes, Estudio técnico.

Abstract

This document addresses the calculation methodology of a suspension bridge, presenting a comprehensive approach that combines theoretical and practical aspects to optimize the design and construction of these iconic structures in civil engineering. Suspension bridges require careful planning and analysis to ensure their safety, durability, and efficiency. The proposed methodology is based on a combination of analytical and numerical methods, which allow engineers to accurately model the complex static and dynamic behaviors of a suspension bridge under various loading and environmental conditions. The article highlights the importance of considering crucial factors such as the geometry of the bridge, the properties of the materials used, the expected loads. The proposed methodology not only focuses on the design stage, but also covers construction and continuous monitoring, providing a comprehensive approach that addresses the entire life cycle of the bridge. This methodological approach has a significant impact on civil engineering by allowing the creation of safer, more efficient and more sustainable suspension bridges. The results of this study have the potential to influence future suspension bridge designs by providing fundamental guidance backed by rigorous analysis.

Keywords: Structural design, Bridges, Technical study.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 05 de junio de 2023.

Fecha de aceptación: 28 de agosto de 2023.

Fecha de publicación: 08 de septiembre de 2023.



1. Introducción

Los puentes colgantes son estructuras fascinantes que han sido utilizadas a lo largo de la historia para conectar áreas separadas por obstáculos naturales como ríos, cañones y valles (Ciquero, 2011). Estas ingeniosas construcciones suspendidas en el aire han desempeñado un papel crucial en la expansión de la infraestructura y la conectividad en diversas regiones del mundo (Zegarra Ciquero, 2007). Los puentes colgantes se caracterizan por su diseño único, que implica la suspensión de una plataforma o pasarela mediante cables y cuerdas anclados a torres o pilares en ambos lados del obstáculo. La tensión y la disposición estratégica de estos cables permiten que el puente sea capaz de soportar el peso de las personas, vehículos y cargas que lo atraviesan (Ampuero Alata, 2012). Este tipo de puentes no solo tienen un impacto funcional, sino también cultural y turístico. Muchos puentes colgantes se han convertido en símbolos icónicos de ciudades y regiones, atrayendo a visitantes de todo el mundo (Cilento, 2000). Además, la construcción y el mantenimiento de estos puentes a

menudo involucran desafíos técnicos significativos, lo que ha llevado a avances en la ingeniería de estructuras y materiales.

Estructura

Se define como un conjunto de elementos capaces de soportar fuerzas y transmitirlos a los diferentes puntos de apoyo con el objetivo de ser resistente y estable. A las fuerzas que actúan en la misma se las denomina como cargas, un ejemplo de ello sería un puente colgante siendo este el tema central (Scribd, 2007).

Puentes Colgantes

Son estructuras de gran relevancia estratégica dentro del portafolio de infraestructura de un país (Díaz, 2010). Ya que, no solo facilitan la comunicación y el transporte de personas y mercancías sobre ríos y desniveles, sino que también desempeñan un papel crucial en situaciones de emergencia al permitir una respuesta rápida y efectiva (Cobo del Arco & Bengoechea, 1996). Además, los puentes tienen un alto costo de construcción por metro cuadrado, lo que hace necesario mantener y

conservar adecuadamente las inversiones realizadas en ellos.

Principios Básicos

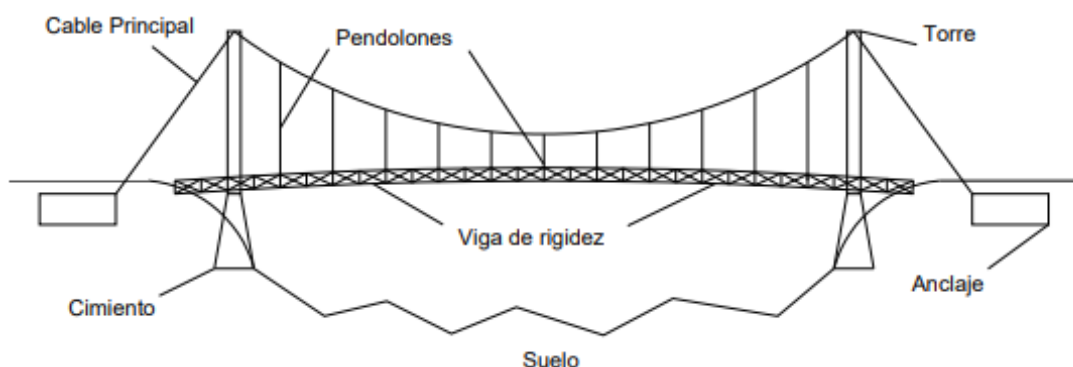
- Este tipo de puentes evita las dificultades potenciales de trabajar en el agua.
- La utilización de cables como elemento estructural tiene por función aprovechar la capacidad

resistente del acero cuando está sometido a tracción.

- Las torres de sustentación son las encargadas de transmitir las cargas al suelo de la cimentación.
- Son apoyados y anclados en la parte alta de las torres de sustentación, y ubicados de una manera simétrica con relación al eje de la vía.

Partes del Puente Colgante

Figura 1. Puente Colgante



Cable Principal. Es un elemento flexible, es decir que no tiene rigidez con lo cual no resiste flexiones. Si se le aplica un sistema de fuerzas, tomará la forma necesaria para que en él sólo se produzcan esfuerzos axiales de tracción; si esto dejara de ser posible no resistiría (Sánchez Fernández, 2005).

Torre. Han sido siempre los elementos más difíciles de proyectar de los puentes colgantes, porque

son los que permiten mayor libertad. Por eso en ellas se han dado toda clase de variantes (Montt, 1900). Con el pasara de los años fueron adquiriendo ya una forma propia, no heredada, adecuada a su función y al material; generalmente tienen dos pilares con sección cajón de alma llena, unidos por riostras horizontales, o cruces de San Andrés.

Pendolón. Es el elemento que une la estructura metálica del puente a los cables que lo sujetan.

Cimientos. Se refiere al conjunto de elementos cuya misión es conectar y transmitir las cargas de la construcción al suelo.

Anclaje. Es un elemento estructural instalado en suelo o roca y que se utiliza para transmitir al terreno una carga de tracción aplicada. Consta básicamente de cabeza, zona libre y bulbo o zona de anclaje.

Vigas de Rigidez. Tienen la capacidad para resistir la deflexión o flexión cuando se aplican momentos de flexión (Dokumen, 2018).

2. Metodología

La metodología se compone de dos etapas fundamentales: una revisión exhaustiva de la literatura existente y la aplicación de un método de cálculo integral que abarca la determinación de la carga última, el foco y la catenaria en el diseño de puentes colgantes. En la primera etapa, se realiza una revisión de la literatura relacionada con puentes colgantes y sus aspectos clave, como las teorías de diseño, los

enfoques estructurales y los métodos de análisis utilizados en investigaciones previas. La segunda etapa de la metodología implica la aplicación de un método de cálculo. Se inicia con la determinación de la carga última que el puente colgante debe soportar. Para esto, se consideran factores como las cargas estáticas y dinámicas, las condiciones de tráfico esperadas y los eventos climáticos extremos. A continuación, se aborda el concepto del foco, que es el punto donde se concentran las fuerzas en la estructura. Este cálculo se basa en análisis rigurosos que consideran la distribución de cargas y la geometría del puente. Posteriormente, se procede a analizar la catenaria, que es la forma natural que adopta el cable principal del puente bajo la influencia de su propio peso y las cargas aplicadas. Este análisis requiere la implementación de métodos numéricos avanzados para determinar con precisión la forma de la catenaria y cómo se relaciona con otros elementos estructurales del puente.

3. Resultados y discusión

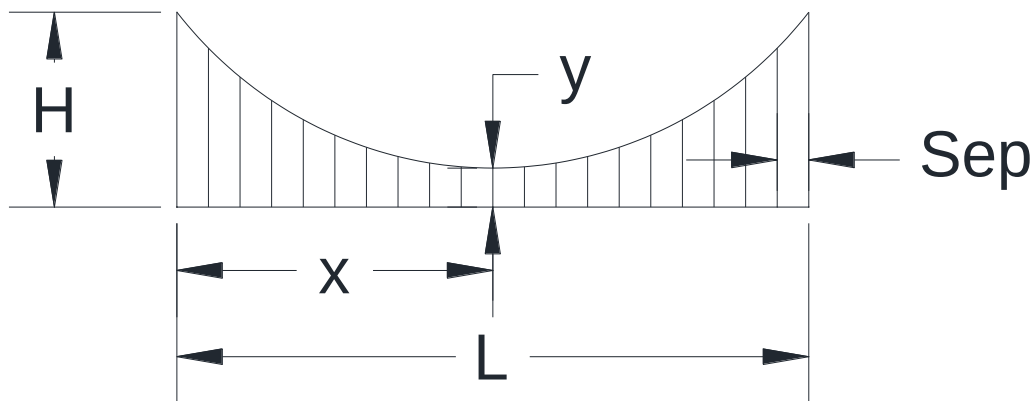
Metodología de Cálculo de un Puente Colgante

Datos:

(L): 35 metros
(H): 10 m
(y): 1,50 m
(B): 3 m
(Sep): 1 m

Materiales y Cargas:

(fy): 4200 Kg/cm² (varillas)
(fy): 5800 Kg/cm² (cable)
Cv: 0,5 ton/m²
Cm: 0,05 ton/m²



Cálculos

Carga Ultima:

$$Cu = 1,2 (Cm) + 1,6(Cv)$$

$$Cu = 0,86 \text{ ton/m}^2$$

Foco:

$$p = \frac{x^2}{4(H - y)} = 26.47 \text{ m}$$

Catenaria:

$$y = \frac{4pH - x^2}{4p}$$

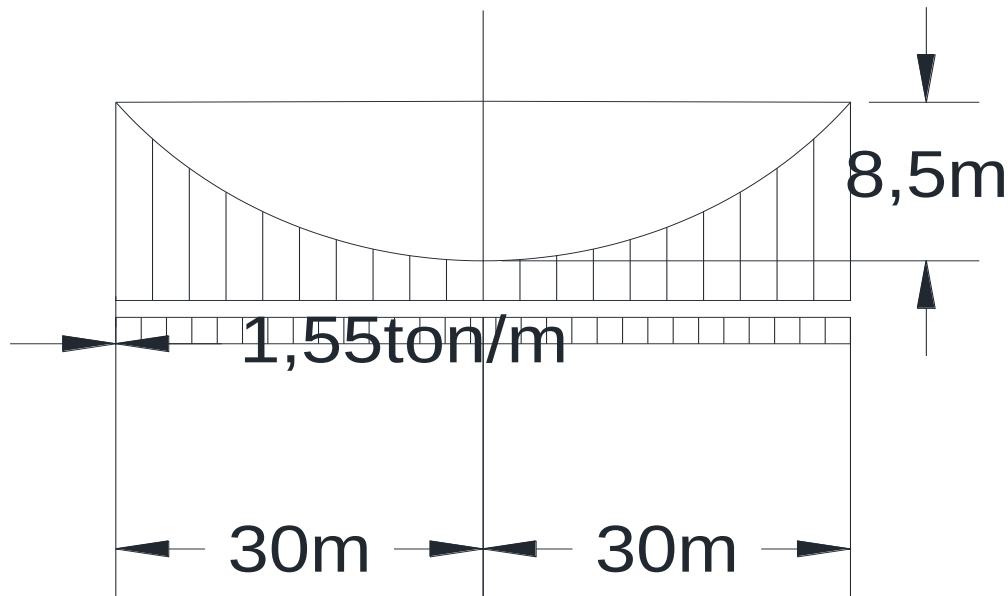
La condición para que la catenaria sea optima:

La componente en x (θ) debe de ser menor a la componente en y (α):

$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{30}{10} \right) = 71,56^\circ$, siendo $\theta = 90^\circ - 71,56^\circ = 18,43^\circ$, por lo tanto, cumple la condición, **OK**.

La altura "y", debe estar ente un 10 – 15% de "H". El 15% del valor de H es de 1,5 m, por lo tanto, cumple la condición **OK**.

Tensión de los Cables en las Columnas y Longitud del Cable Columna a Columna



Tensión Mínima

$$T_o = F_H = \frac{W_o + L^2}{2 * h} = 82,06 \text{ ton}$$

$$T_{max} = \sqrt{(F_H)^2 + (W_o * L)^2} = 94,319 \approx 94,32 \text{ ton}$$

$$T_{max} = W_o * L * \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2 * h}\right)^2} = 94,318 \approx 94,32 \text{ ton}$$

Distancia del Cable hasta la Mitad del Puente

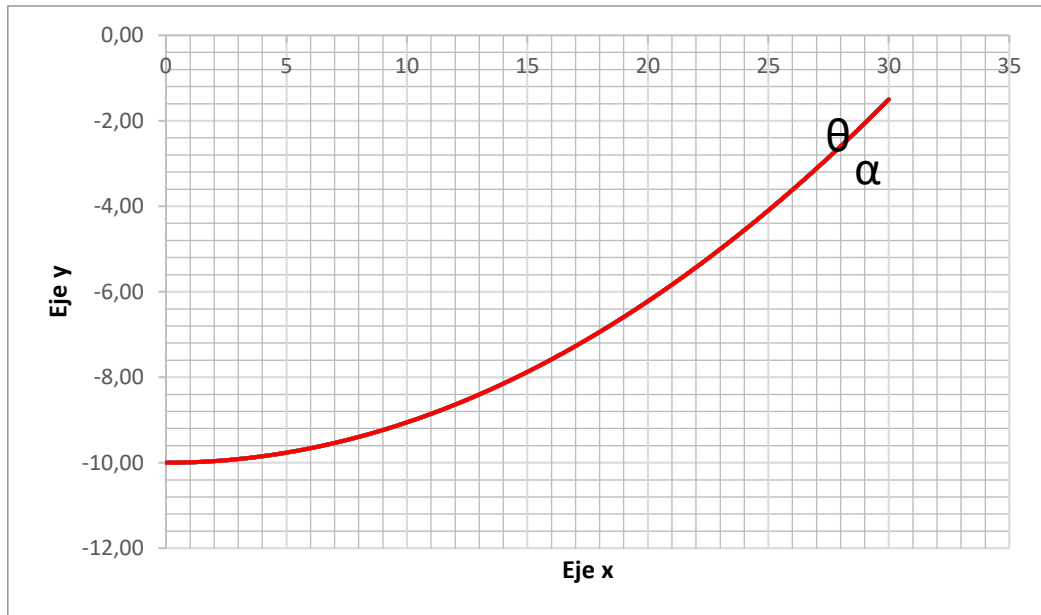
$$S = L * \left[1 + \frac{2}{3} * \left(\frac{h}{L}\right)^2 - \frac{2}{5} * \left(\frac{h}{L}\right)^4 \right] = 31,05 \text{ m}$$

Distancia Total del Cable de Torre a Torre

$$L_{total} = 2 * S = 62,1018 \approx 62,102 \text{ m}$$

La catenaria se calcula hasta la mitad ya que el puente es simétrico.

Coordenadas		16,00	-7,58
x	y	17,00	-7,27
0	-10,00	18,00	-6,94
1,00	-9,99	19,00	-6,59
2,00	-9,96	20,00	-6,22
3,00	-9,92	21,00	-5,84
4,00	-9,85	22,00	-5,43
5,00	-9,76	23,00	-5,00
6,00	-9,66	24,00	-4,56
7,00	-9,54	25,00	-4,10
8,00	-9,40	26,00	-3,62
9,00	-9,24	27,00	-3,12
10,00	-9,06	28,00	-2,60
11,00	-8,86	29,00	-2,06
12,00	-8,64	30,00	-1,50
13,00	-8,40		
14,00	-8,15		
15,00	-7,88		



Péndolas

$$Num = \left(\frac{L}{sep+1} \right) * 2 \quad Num = 122 \text{ unidades}$$

$$Pi = \frac{L * B * Cu}{Num} = 1.27 \text{ ton}$$

Cada péndola soportara 1,27 ton de carga final a tensión.

Toda estructura metálica que trabaja a tensión se usa la siguiente expresión:

$Pi = 0,9 * As * Fy$; despejando As , nos queda:

$$As = Pi * \frac{1000}{0.9} * Fy = 34 \text{ cm}^2$$

$$As = \frac{\pi \left(\frac{fi}{10} \right)^2}{4}$$

Despejando fi : $fi = \sqrt{\frac{As * 400}{\pi}}$

$fi = 7 \text{ mm} \approx 8 \text{ mm}$; comprobando el área de acero con el fi designado

$$As = 0,5026 \geq 0,34 \text{ OK.}$$

Tubo de Piso

$$Wr = \frac{l * B * Cu}{2}$$

$Wr = 1,29 \text{ ton/m}$; peso a soportar el tubo

$$M_u = \frac{Wr * l^2}{9}; \text{ sistema continuo/articulado}$$

$$M_u = 0,14 \text{ ton} - m$$

$$S_x = Mu * \frac{100000}{0,8 * fy}; \text{ módulo de sección del tubo a usar.}$$

$$S_x = 7,08 \text{ cm}^3$$

$$b = 4 \text{ cm}$$

$$p = A * 0,785; \text{ peso volumétrico del acero}$$

$$h = 8 \text{ cm}$$

$$p = 3,64 \text{ kg/m}$$

$$S_x = \frac{I}{c}; \text{ módulo de sección } c = \frac{2}{h}; I = \frac{bh^3}{12}, \text{ entonces; } S_x = \frac{2}{h} * \left(\frac{bh^3}{12} - \frac{(b-2e)(h-2e)^3}{12} \right)$$

$$S_x = 9,74 \text{ cm}^3; \text{ módulo de sección que tendrá el tubo } 4 \times 8 \times 0,2 \text{ cm OK.}$$

$$Wr = \frac{B * sep * Cv}{2 * sep} = 0,75 \text{ ton/m}; \text{ carga repartida sobre los tubos.}$$

Columna Principal

$Fm = 2,1$; factor de mayoración en consideración al peso propio de los materiales

$$Pu = \frac{L * B * Cu}{4} * Fm$$

$Pu = 81,27 \text{ ton}$; carga ultima a la que estara sometida la columna

apoyos = 2

$$sep = \frac{H}{apoyos + 1}$$

$sep = 3,33 \text{ m}$; separacion de los apoyos en la columna principal



$$fy = A * \frac{1000}{14,23}$$

$$A = 2530 \frac{kg}{cm^2}; \text{fluencia del acero en la columna principal}$$

$$E = 2100000 ; \text{módulo elástico del acero}$$

$$\text{dim libre} = 30 \text{ cm} ; \text{dim apoyada} = 25 \text{ cm} ;$$

$$e = 0,6 \text{ cm} ; . \text{secciones del tubo}$$

$$A = \text{dim libre} * \text{dim apoyada} - (\text{dim libre} - 2 * e) * (\text{dim apoyada} - 2 * e)$$

$$A = 64,56 \text{ cm}^2$$

$$\text{peso} = A * 0,785 = 50,68 \text{ kg/m}$$

Inercia

$$I_x = \frac{\text{dim libre} * \text{dim apoyada}^3}{12} - \frac{[(\text{dim libre} - 2 * e) * (\text{dim apoyada} - 2 * e)^3]}{12}$$

$$I_x = 6707,45 \text{ cm}^4; \text{inercia que tendrá el elemento en sentido "x" o arriostrada}$$

$$I_y = \frac{\text{dim apoyada} * \text{dim libre}^3}{12} - \frac{[(\text{dim apoyada} - 2 * e) * (\text{dim libre} - 2 * e)^3]}{12}$$

$$I_y = 8872,39 \text{ cm}^4; \text{inercia que tendrá el elemento en sentido "y" o libre}$$

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 10,19 \text{ cm}; \text{radio de giro del elemento en el sentido "x" / arriostrada.}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 11,72 \text{ cm}; \text{radio de giro del elemento en el sentido "y" o libre.}$$

$$Esb_x = \frac{sep*100}{r_x} = 32,70 ; \text{ esbeltez en el sentido "x" de la columna}$$

$$Esb_y = \frac{sep*100}{r_y} = 85,30 ; \text{ esbeltez en el sentido "y" de la columna}$$

$$Fe_x = \frac{\pi^2 * E}{Esb_x^2} = 19380,16 \frac{kg}{cm^2}; \text{ esfuerzo de Euler en "x"}$$

$$Fe_y = \frac{\pi^2 * E}{Esb_y^2} = 2848,38 \frac{kg}{cm^2}; \text{ esfuerzo de Euler en "y"}$$

$$Pr_x = si (Esb_x < 4,71 \sqrt{\frac{E}{fy}}; \text{ entonces usar; } 0,658 \left(\frac{fy}{Fex}\right) * fy * 0,9 * A_s / 1000; \text{ si no}$$

cumple usar entonces; $0,877 * Fe_x * 0,9 * A_s / 1000$; tomada del AISC, mediante esta condición de capacidad resistente se obtendrán las dimensiones de la columna siempre y cuando cumpla la demanda o carga última sobre la capacidad resistente del material

$$Pr_x = 139,18 \text{ ton}$$

$$Pr_y = si (Esb_y < 4,71 \sqrt{\frac{E}{fy}}; \text{ entonces usar; } 0,658 \left(\frac{fy}{Fex}\right) * fy * 0,9 * A_s / 1000; \text{ sino}$$

$$Pu \geq Pr; \text{ demanda/capacidad}$$

$$Pu \geq Pr_x = 81,27 \text{ ton} \geq 139,18 \text{ ton} ; \text{ cumple OK}$$

$$Pu \geq Pr_y = 81,27 \text{ ton} \geq 101,36 \text{ ton} ; \text{ cumple OK}$$



4. Conclusiones

En conclusión, los puentes colgantes han desempeñado un papel esencial en la historia de la ingeniería y la conectividad humana. A lo largo de los años, han evolucionado desde simples pasarelas suspendidas hasta monumentos emblemáticos y obras maestras de diseño y tecnología. Estas son algunas de las principales conclusiones sobre el tema de los puentes colgantes:

Innovación Ingenieril: Los puentes colgantes demuestran la capacidad de la humanidad para resolver problemas técnicos complejos. La innovación en diseño, materiales y técnicas de construcción ha llevado a la creación de estructuras cada vez más impresionantes y funcionales.

Conectividad: Estas estructuras han permitido la conexión de comunidades separadas por barreras naturales, mejorando la accesibilidad y la comunicación entre regiones y personas. Han sido vitales para el desarrollo económico y social en muchas áreas.

Iconos Culturales: Muchos puentes colgantes se han convertido en símbolos icónicos de ciudades y

regiones, a menudo atrayendo turistas y contribuyendo a la identidad cultural y el orgullo local.

Retos y Logros: La construcción y el mantenimiento de puentes colgantes a menudo presentan desafíos únicos, como condiciones climáticas adversas, diseño de cimientos sólidos y tensión adecuada de cables. Superar estos desafíos ha llevado a avances significativos en la ingeniería.

Avances Tecnológicos: La investigación y desarrollo de materiales resistentes y duraderos, así como técnicas de construcción innovadoras, han sido impulsados en parte por la necesidad de construir puentes colgantes seguros y eficientes.

Preservación Histórica: Algunos puentes colgantes históricos siguen en pie, lo que resalta la importancia de preservar estas estructuras como parte del patrimonio cultural y técnico de la humanidad.

En general, los puentes colgantes son ejemplos impresionantes de la capacidad humana para resolver desafíos y crear soluciones que unen geografías separadas. A medida que

la tecnología y la ingeniería continúan avanzando, es probable que veamos puentes colgantes aún más sorprendentes y funcionales en el futuro.

Bibliografía

Ampuero Alata, E. J. (2012). Consideraciones estructurales en el análisis y diseño de puentes colgantes.

Cilento, A. (2000). Puentes y puentes colgantes. Tecnología y Construcción, 16(2).

Ciquero, L. A. Z. (2011). Análisis y diseño de puentes colgantes. Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru).

Cobo del Arco, D., & Bengoechea, A. (1996). Una aproximación al estudio de puentes colgantes. Hormigón y Acero, 47(199).

Díaz, J. G. (2010). La construcción de puentes colgantes en Colombia durante el siglo XIX: entre la tradición y la innovación. fr. Orlando Rueda Acevedo, OP Rector Universidad Santo Tomás fr. Guillermo León Villa Hincapié, OP Vicerrector Académico fr. José Rodrigo Arias Duque, OP, 4.

Dokumen. (2018). Obtenido de <https://dokumen.tips/docume>

nts/informe-del-puente-colgante.html

Montt, E. V. (1900). Algunas anotaciones sobre puentes colgantes. In Anales del Instituto de Ingenieros de Chile (No. 112, pp. 185).

Sánchez Fernández, L. L. (2005). Análisis y diseño de puentes colgantes vehiculares tipo cuadricable.

Scribd. (2007). puentes colgantes. En estructura diseño de puentes.

Zegarra Ciquero, L. A. (2007). Análisis y diseño de puentes colgantes.