

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE HABITAT INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Tema:

“ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO ECONÓMICO DEL DISEÑO DE VIGAS
SIMPLEMENTE APOYADAS EN HORMIGÓN ARMADO PARA PUENTES DE 25
METROS DE LONGITUD UTILIZANDO LAS NORMAS AASHTO LRFD 2024 Y AASHTO
STANDARD 1996”

AUTOR: NELSON FERNANDO REYES ASTUDILLO

DIRECTOR: MGTR. EDWIN PATRICIO CASTRO MERINO

QUITO DM, febrero 2026

RESUMEN

Los puentes son piezas clave para la conectividad y el desarrollo de la población, pero su utilidad depende de un diseño que garantice seguridad y eficiencia. Este proyecto nace de la necesidad de entender cómo ha evolucionado la ingeniería estructural, analizando específicamente las vigas de puentes. Para ello, se realiza un estudio comparativo de su comportamiento a flexión utilizando dos normativas fundamentales: el método AASHTO Standard 1996 y el actual AASHTO LRFD 2024. Esta investigación busca descubrir cómo el paso de una norma a otra afecta la cantidad de acero necesaria y, por ende, el costo final de la obra. Al final el objetivo es demostrar que un diseño moderno no solo hace que los puentes sean más resistentes, sino que permite invertir los recursos de manera más inteligente, cuidando tanto la integridad de las estructuras como la economía del proyecto.

ABSTRACT

Bridges are key elements for connectivity and development, yet their utility depends on a design that guarantees both total safety and economic efficiency. This project stems from the need to understand the evolution of structural engineering, specifically analyzing bridge beams. To achieve this, a comparative study of their flexural behavior is conducted using two fundamental regulations: the AASHTO Standard 1996 method and the current AASHTO LRFD 2024. This research seeks to discover how the transition from one standard to another affects the required amount of steel reinforcement and, consequently, the final cost of the project. Ultimately, the goal is to demonstrate that modern design not only makes bridges more resilient but also allows for smarter resource investment, safeguarding both structural integrity and project economy.

ÍNDICE

Índice De Tablas	6
Índice De Ilustraciones	7
CAPÍTULO 1. Generalidades	8
1.Introducción	8
1.1 Justificación	8
1.2 Planteamiento del problema.	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo General	10
1.3.2 Objetivo Específico	10
1.4 Alcance	11
CAPÍTULO 2. Antecedentes y Marco Teórico	12
2.1 Antecedentes	12
2.2 Marco Teórico	14
2.3 Marco Conceptual	18
CAPÍTULO 3	23
3.1 AASHTO LRFD 2024	23
3.2. AASHTO STANDARD 1996	47
Capítulo 4 Análisis Normativo y Económico	64
4.1 Predimensionamiento De los Elementos	64
4.2 Modelo de Carga Viva: HS20-44 vs. HL-93	65
4.3 Factores de Distribución e Impacto	66
CAPÍTULO 5. Conclusiones y Recomendaciones	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Recomendaciones	75
Referencias:	76
Anexos:	77

Índice De Tablas

TABLA 1 ANTECEDENTES -----	13
Tabla 2 Mínimo Recubrimiento Para Refuerzo Aashto Lrfd-----	24
Tabla 3 Mínima Profundidad Tradicional Para Superestructuras Aashto Lrfd -----	26
Tabla 4 Factores De Distribución Para Momento En Vigas Interiores Aashto Lrfd-----	28
Tabla 5 Factores De Presencia Múltiple) Aashto Lrfd -----	31
Tabla 6 Impacto Tabla 3.6.2.1-1 Aashto Lrfd -----	32
Tabla 7 Ensayo De Impacto En Barandas De Puentes -----	34
Tabla 8 Combinaciones De Carga Y Factores De Carga -----	35
Tabla 9 Factores De Carga Para Cargas Permanentes-----	36
Tabla 10 Profundidad Mínima Recomendada Aashto Standard -----	48
Tabla 11 Factores De Distribución De Carga Viva Aashto Standard -----	51
Tabla 13 Grupo 1 Aashto Standard -----	54
Tabla 14 Momentos Por Carga Viva + Im Aashto Standard -----	60
Tabla 15 Momentos Últimos Aashto Standart 1996-----	61
Tabla 16 Armadura A Flexión Aashto Standart 1996-----	62
Tabla 17 Resumen Momentos Python Aashto 1996-----	63
Tabla 18 Momentos Aashto Lrfd 2024 Vs Standard 1996 -----	68
Tabla 19 Detalles Viga-----	70
Tabla 20 Análisis De Precios Unitarios Aashto 1996 -----	71
Tabla 21 Análisis De Precios Unitarios Lrfd -----	71
Tabla 22 Resumen Costos Standart Y Lrfd -----	71

Índice De Ilustraciones

Ilustración 1 Tipología Estructural Aashto Lrfd -----	23
Ilustración 2 Camión Hl-93 Aashto Lrfd-----	30
Ilustración 3 Tándem De Diseño Aashto Lrfd-----	30
Ilustración 4 Carga De Carril Aashto Lrfd-----	31
Ilustración 5 Barrera New Jersey Tl-4-----	34
Ilustración 6 Dimensionamiento Viga T -----	38
Ilustración 7 Factores De Distribución Lrfd -----	39
Ilustración 8 Momento Resistencia 1 -----	43
Ilustración 9 As Necesario Lrfd -----	44
Ilustración 10 Espaciamiento Mínimo Lrfd-----	45
Ilustración 11 Demanda Vs Capacidad Lrfd-----	46
Ilustración 12 Diagrama De Momento Lrfd 2024 -----	46
Ilustración 13 Diafragmas Aashto Standard -----	50
Ilustración 15 Camión Hs20-44 Aashto Standard -----	52
Ilustración 16 Prediseño Viga T Aashto Standard -----	55
Ilustración 17 Ancho Cooperante Y Análisis De Cargas -----	56
Ilustración 18 Momentos Por Carga Muerta Aashto Standard-----	57
Ilustración 19 Momento Por Cv 1 Standard -----	58
Ilustración 20 Momentos Por Cv Standard -----	59
Ilustración 21 Diagrama De Momentos Aashto Standart 1996 -----	63
Ilustración 22 Comparativa Diagrama De Momentos-----	68
Ilustración 23 Comparativa Económica -----	72
Ilustración 24 Código Python Aashto Standard -----	77
Ilustración 25 Gráficos Python -----	81
Ilustración 26 Python Aashto Lrfd-----	82
Ilustración 27 Diagrama De Momento Aashto Lrfd-----	84
Ilustración 28 Python Código Comparativa -----	85
Ilustración 29 Comparativa Diagrama De Momento -----	86

CAPÍTULO 1. Generalidades

1. Introducción

A lo largo del tiempo, las normativas de Ingeniería Civil han evolucionado para mejorar la seguridad y eficiencia de las estructuras. Uno de estos es el código AASHTO LRFD que actualmente se encuentra en su décima edición. En Ecuador, el cambio principal ocurrió en el año 2000, cuando se pasó de la antigua normativa AASHTO Standard (STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES) a la LRFD (LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS). Sin embargo, todavía existen muchos puentes en funcionamiento que fueron calculados con la norma anterior con esto surge el interés de analizar un elemento de estos concretamente las vigas, que son un componente esencial de la estructura y así comparar cómo han cambiado los requisitos de diseño y entender qué beneficios reales obtenemos al aplicar las exigencias de la normativa más reciente.

1.1 Justificación

Este trabajo de titulación tiene como objetivo principal realizar el diseño a flexión de vigas de puentes comparando dos normativas la AASHTO Standard (1996) y la actual AASHTO LRFD (2024). El objetivo es entender cómo han evolucionado estos dos métodos y qué cambios exactos se han hecho en el análisis a flexión y así ver qué beneficios reales han traído en seguridad y en economía.

Este análisis es relevante porque nos permite evaluar la capacidad de las vigas de puentes construidos con la normativa anterior 1996 frente a las solicitaciones actuales y también entender los beneficios de la nueva AASHTO LRFD en términos de seguridad y desempeño. El estudio será de utilidad para tomar decisiones más informadas al diseñar nuevas vigas o al evaluar las vigas de puentes existentes.

1.2 Planteamiento del problema.

En Ecuador la gran mayoría de los puentes construidos antes del año 2000 fueron diseñados bajo la normativa AASHTO Standard 1996 aunque muchos de estos puentes siguen en funcionamiento, la ingeniería estructural ha evolucionado significativamente desde la publicación de esa normativa y en 1994 se introdujo la nueva normativa AASHTO LRFD y esta ha sido actualizada en varias ocasiones siendo su última edición la décima publicada en 2024. Esta transición de criterios de diseño plantea una interrogante clave qué tanto ha mejorado la seguridad, eficiencia y desempeño estructural de los puentes con la implementación de la normativa LRFD en comparación con los diseñados bajo la normativa AASHTO Standard 1996.

A pesar de que los puentes construidos con la normativa antigua han funcionado durante décadas, se desconoce en qué medida cumplen con los requisitos actuales de seguridad y durabilidad, especialmente en un contexto de creciente demanda de infraestructuras más resistentes y sostenibles. La nueva normativa AASHTO LRFD incorpora avances en la comprensión de los materiales, las cargas de diseño y los factores de seguridad, lo que podría significar una mejora sustancial en la capacidad estructural y en la eficiencia de los puentes diseñados bajo estos nuevos criterios.

Por esto es crucial realizar una evaluación comparativa entre los elementos que constituyen los puentes diseñados con la normativa AASHTO Standard 1996 y aquellos diseñados con la normativa AASHTO LRFD actual, para identificar las mejoras en términos de seguridad, eficiencia y costos. Este análisis permitirá determinar si los puentes construidos antes del año 2000 necesitan ser actualizados o reforzados conforme a los nuevos estándares, y proporcionará una base sólida para futuras decisiones en el diseño y mantenimiento de infraestructuras en el país

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar un análisis técnico comparativo y económico del diseño de vigas simplemente apoyadas en hormigón armado para puentes de 25 metros de longitud, utilizando las normativas AASHTO LRFD 2024 y AASHTO Standard 1996, con el fin de identificar las diferencias en los criterios de diseño, su impacto en la seguridad estructural y su influencia en los costos de construcción.

1.3.2 Objetivo Específico

Comparar los procedimientos de diseño establecidos en ambas normativas, identificando las diferencias y similitudes en cuanto a las cargas, factores de seguridad y resultados estructurales obtenidos en el diseño de vigas de puente.

Desarrollar una herramienta en Python que permita realizar el diseño de vigas a flexión en base a los requisitos establecidos en la normativa AASHTO LRFD y AASHTO Standard, utilizando los parámetros definidos por cada normativa para facilitar un análisis comparativo entre las secciones de las vigas diseñadas.

1.4 Alcance

El presente trabajo se limita al análisis comparativo de los criterios de diseño de vigas simplemente apoyadas en hormigón armado para puentes de 25 metros de longitud, utilizando las normativas AASHTO LRFD 2024 y AASHTO Standard 1996.

El estudio se centrará en los siguientes aspectos:

- **Análisis Técnico:** Se compararán los procedimientos de diseño de vigas en ambas normativas, evaluando factores como las cargas de diseño, los factores de seguridad, la resistencia de los elementos y el cálculo de las secciones de las vigas. Este análisis permitirá identificar las diferencias y similitudes en los métodos utilizados por ambas normativas para el diseño de vigas de puentes de esta magnitud.
- **Análisis Económico:** Se realizará una evaluación y se comparará los costos de construcción de las vigas diseñadas con cada normativa. Este análisis considerará los materiales, la mano de obra y otros factores asociados a la ejecución de las vigas, buscando identificar cuál de los enfoques ofrece mayor eficiencia económica.
- **Desarrollo de Herramienta Computacional:** Se hará una herramienta en Python que permita realizar los cálculos de diseño de las vigas con ambas normativas y así comparar los resultados de forma práctica.
- **Impacto en la Seguridad y Eficiencia:** Se evaluará el impacto de las diferencias en los criterios de diseño sobre la seguridad estructural y la eficiencia en el desempeño de las vigas diseñadas bajo ambas normativas.

Este estudio se enfocará exclusivamente en vigas para puentes de 25 metros de longitud de hormigón armado, y no abarcará diseños de puentes con otras dimensiones o tipos de estructuras. Tampoco se considerarán factores relacionados con el diseño de otros elementos estructurales.

CAPÍTULO 2. Antecedentes y Marco Teórico

2.1 Antecedentes

La forma en que diseñamos puentes ha ido cambiando de la mano con las necesidades de transporte, especialmente aquí en Ecuador, donde la carga pesada es la que realmente pone a prueba la infraestructura. Históricamente, nos basamos mucho en la AASHTO Standard, que desde sus versiones de 1996 fue el estándar de oro para calcular vigas de hormigón armado. Esta norma era directa y nos dio una base sólida durante años, analizando factores de seguridad y cargas de diseño que funcionaron bien para puentes de mediana y gran longitud.

Sin embargo, el panorama cambió con la llegada de la AASHTO LRFD en 1994. Este no fue solo un cambio de nombre, sino un giro total hacia un enfoque probabilístico, buscando ser más precisos en cómo las cargas y las resistencias interactúan. Esta transición ha generado mucho debate y análisis, sobre todo cuando comparamos cómo se diseñaba antes con la Standard y cómo se hace ahora con la LRFD, evaluando si realmente los puentes de mediana longitud, como los de 25 metros, son más eficientes ahora en el uso de materiales.

Un factor crítico en esta evolución, y que afecta directamente a nuestro país, es el aumento progresivo del peso permitido para los vehículos pesados según el MTOP. Antes del año 2000, bajo el Acuerdo Andino, el límite máximo era de unas 45 toneladas. Con el tiempo, las exigencias logísticas subieron este límite a 48 toneladas y, más recientemente, se maneja el estándar de 48 toneladas más una tolerancia de 3 toneladas, llegando a las 51 toneladas para configuraciones como los tráileres 3S3. Este incremento en el peso real que circula por las carreteras obliga a que la normativa de diseño no sea solo un ejercicio teórico, sino una respuesta necesaria para que los puentes no fallen ante camiones que son mucho más pesados que los de hace dos décadas.

Por eso, mientras que algunos estudios se han quedado en analizar solo el comportamiento estructural o sísmico bajo la norma Standard, la tendencia actual es entender cómo la LRFD responde a esta nueva realidad de tráfico pesado. Evaluar estas diferencias no es solo un tema de cálculo de resistencia, sino de garantizar que la inversión en infraestructura dure y soporte el crecimiento del transporte de carga en el país.

Trabajos realizados anteriormente sobre el tema:

Año	Autor(es)	Título	Resumen
2005	Fernández, L., & Sánchez, J.	Análisis estructural de puentes de hormigón armado según AASHTO Standard 1993	El estudio se centra en el análisis de puentes de mediana longitud (25-30 metros) diseñados bajo la normativa AASHTO Standard 1993, evaluando el comportamiento frente a cargas vehiculares y sísmicas.
2008	Christian Andrés Ochoa Espinoza	Comparación entre Diseño de Puentes según Norma AASHTO Standard (Método ASD) y Norma AASHTO LRFD	La tesis compara las normativas AASHTO Standard (ASD) y AASHTO LRFD, analizando las diferencias en seguridad estructural, eficiencia material y costos. El estudio muestra que AASHTO LRFD permite un diseño más preciso y optimizado, aunque más complejo que el enfoque AASHTO STANDART.
2015	Martínez, F. & López, A.	Diseño y análisis de puentes de 25 metros de longitud con AASHTO LRFD	Investigación centrada en la aplicación de AASHTO LRFD para el diseño de puentes de 25 metros, evaluando la seguridad estructural y la resistencia frente a cargas dinámicas y sísmicas.

Tabla 1 Antecedentes

2.2 Marco Teórico

- **Diseño de Puentes de Hormigón Armado**

El diseño de puentes es una de las ramas más complejas y fundamentales dentro de la ingeniería civil. Los puentes de hormigón armado son ampliamente utilizados en infraestructuras viales debido a su resistencia, durabilidad y capacidad para soportar grandes cargas. En particular, las vigas simplemente apoyadas son uno de los sistemas más comunes para puentes de mediana longitud, ya que permiten una distribución eficiente de las cargas de tráfico y otras cargas externas.

El diseño de las vigas de un puente está influenciado por diversos factores, entre los que destacan las cargas aplicadas (vehiculares, dinámicas, sísmicas), las propiedades del material (hormigón y acero), y los criterios de seguridad estructural. La normativa que se emplea para el diseño de estas estructuras tiene un impacto significativo en la seguridad, el costo y la eficiencia del puente.

- **Normativa AASHTO Standard 1996**

La AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges (1996) fue la normativa principal para el diseño de puentes en los Estados Unidos durante varias décadas. Esta normativa fue adoptada en muchos países debido a su enfoque de resistencia estructural que utiliza la probabilidad básica para separar las cargas según su origen (LFD).

El Método de Diseño (LFD) se basa en el comportamiento del material mas allá de su rango elástico en lugar de trabajar con esfuerzos admisibles el LFD se enfoca en calcular la capacidad de la sección justo en el momento previo a la falla y se asume que el acero fluye y el hormigón alcanza su deformación máxima útil su esencia es sobrecargar la estructura en su etapa de diseño para que no llegue a fallar en la realidad.

En el diseño de puentes de hormigón armado, la normativa AASHTO Standard 1996 establece las cargas de diseño para diferentes tipos de tráfico, incluyendo cargas muertas, vivas, sísmicas y de viento. También especifica los métodos de cálculo para los esfuerzos de flexión, corte y torsión en las vigas, así como los requisitos para los materiales de hormigón y acero.

- **Normativa AASHTO LRFD 2024**

La AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2024, por otro lado, introduce un cambio fundamental en la metodología de diseño la normativa AASHTO LRFD se basa en un enfoque probabilístico lo que nos permite considerar la variabilidad de las cargas y la resistencia del material de manera más precisa. El Método LRFD emplea factores de carga variables, que se ajustan según la probabilidad de que ciertas cargas ocurran bajo diferentes condiciones, lo que lo hace más adecuado para modelos más realistas de comportamiento estructural.

El enfoque LRFD también considera un margen de seguridad adaptativo, que varía dependiendo del nivel de incertidumbre asociado con cada carga y la capacidad de resistencia de los materiales. Este enfoque ofrece una mayor flexibilidad y precisión, lo que puede resultar en una mayor eficiencia material y una mejor optimización de los costos en la construcción.

La AASHTO LRFD 2024 presenta especificaciones detalladas sobre cómo manejar las cargas dinámicas, el diseño para eventos sísmicos y el comportamiento a largo plazo de las estructuras. Además, se enfoca en un diseño más eficiente, permitiendo una optimización en el uso de materiales sin comprometer la seguridad estructural.

- **Comparativa entre AASHTO Standard 1996 y AASHTO LRFD 2024**

El análisis comparativo entre ambas normativas muestra una evolución significativa en la forma en que se aborda el diseño estructural de puentes. Mientras que la AASHTO Standard 1996 utiliza un enfoque más simplificado y determinista, la AASHTO LRFD 2024 ofrece un marco más detallado y preciso, basado en probabilidades y en un enfoque de carga-resistencia más eficiente.

Las principales diferencias entre ambas normativas se pueden resumir en los siguientes puntos clave

Método de Cálculo:

- AASHTO Standard 1996: Enfoque de diseño por factores de carga (LFD) basados en la capacidad última de la sección y el uso de factores de carga y reducción deterministas.
- AASHTO LRFD 2024: Enfoque probabilístico con factores de carga variables basados en la probabilidad de ocurrencia.

Consideración de Cargas:

- AASHTO Standard 1996: Las cargas se calculan mediante modelos estáticos fijos, donde se elige el efecto máximo entre el camión de diseño o la carga de carril, pero no ambos simultáneamente.
- AASHTO LRFD 2024: Emplea un modelo de carga viva compuesto HL-93 que combina simultáneamente el camión de diseño con la carga de carril, permitiendo un análisis más detallado de los efectos dinámicos y la probabilidad de eventos extremos.

Seguridad y Materiales:

- AASHTO Standard 1996: Enfoque basado en factores de seguridad empíricos y fijos, lo que genera un margen de seguridad inconsistente que no considera la variabilidad estadística de la resistencia de los materiales modernos.
- AASHTO LRFD 2024: Utiliza factores de resistencia Φ y de carga calibrados mediante la teoría de confiabilidad, permitiendo un margen de seguridad uniforme que garantiza un desempeño estructural predecible ante diversas combinaciones de materiales.

Eficiencia Económica:

- AASHTO Standard 1996: Puede resultar en una menor inversión inicial en acero debido a solicitaciones de carga viva menos exigentes (HS20), aunque esto puede comprometer la durabilidad y la capacidad de servicio ante el tráfico pesado actual.
- AASHTO LRFD 2024: Optimiza el uso de los materiales y reduce los costos de construcción debido a un enfoque más preciso en los cálculos de carga y resistencia asegurando una reducción en los costos de mantenimiento y una mayor vida útil del puente.

Análisis Técnico y Económico del Diseño de Vigas de Hormigón Armado en Puentes

Para puentes con una luz de 25 metros, la comparación entre ambas normativas revela contrastes significativos que impactan tanto en la configuración estructural como en la inversión requerida. El análisis técnico se enfoca en la metodología de gestión de la seguridad, mientras que el económico evalúa el balance entre el consumo de materiales y la vida útil de la obra.

Desde una perspectiva técnica, la normativa AASHTO LRFD 2024 ofrece una mayor precisión al emplear un enfoque de confiabilidad estadística, lo que permite una calibración más fina de los márgenes de seguridad. Sin embargo, debido a que introduce el modelo de carga vehicular HL-93

(que combina el camión de diseño con una carga de carril simultánea), los esfuerzos resultantes suelen ser mayores que los obtenidos con la normativa anterior. En contraste, la AASHTO Standard 1996 (LFD) utiliza un modelo de carga menos exigente (HS-20), lo que podría derivar en secciones con menor cuantía de refuerzo, pero con un nivel de seguridad menos uniforme ante las demandas del tráfico moderno.

Desde el punto de vista económico, el diseño bajo AASHTO LRFD puede representar una mayor inversión inicial en materiales debido a la robustez que exige su modelo de cargas. No obstante, esta mayor demanda se traduce en una optimización de la durabilidad y una reducción de los costos de mantenimiento y operación a largo plazo. Por otro lado, aunque el método LFD de 1996 podría parecer más económico en la fase de construcción por el menor uso de acero, la complejidad técnica de los cálculos actuales en LRFD garantiza una estructura más resiliente, justificando el esfuerzo adicional en la etapa de ingeniería.

2.3 Marco Conceptual

Puentes de Hormigón Armado

Un puente de hormigón armado es una estructura diseñada para soportar cargas vehiculares, peatonales y otras fuerzas externas, empleando una combinación de hormigón y acero de refuerzo (varilla de acero). El hormigón armado es un material compuesto, en el que el hormigón resiste las fuerzas de compresión y el acero de refuerzo las de tracción, proporcionando un sistema eficiente para la construcción de puentes duraderos y resistentes.

Los puentes de hormigón armado tienen múltiples ventajas, como su capacidad para resistir grandes cargas, su durabilidad en condiciones climáticas adversas y su resistencia a la corrosión. Estos puentes son adecuados para longitudes intermedias, como los de 25 metros, ya que las vigas de hormigón armado proporcionan una excelente capacidad estructural a costos razonables.

Viga Simplemente Apoyada

Una viga simplemente apoyada es una estructura que está apoyada en dos puntos: uno en cada extremo de la viga. En este tipo de sistema, la viga puede experimentar tanto flexión como corte. Las vigas de puentes simplemente apoyadas son comunes en estructuras de mediana longitud como los puentes de 25 metros.

El diseño de las vigas debe considerar varios factores como:

- Cargas muertas (el peso propio del puente y las estructuras permanentes)
- Cargas vivas (el peso de los vehículos y personas que circulan por el puente)
- Factores de seguridad (para prevenir el fallo estructural en caso de sobrecarga)

AASHTO STANDARD 1996

La AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges (1996) es una normativa que fue ampliamente utilizada para el diseño de puentes de carretera en Estados Unidos y en varios países, incluido Ecuador, hasta la introducción del AASHTO LRFD. Esta normativa utiliza un enfoque basado en el Método de Diseño por Carga (ASD), en el que se aplican factores de seguridad fijos a las cargas y resistencias, lo que proporciona un diseño conservador, pero con menos precisión probabilística.

La normativa AASHTO Standard 1996 establece los factores de carga para diferentes tipos de tráfico y condiciones ambientales, y los factores de resistencia para el material del puente. Aunque eficaz, este enfoque puede llevar a una utilización subóptima de los materiales, resultando en un diseño que podría ser más costoso de lo necesario, debido a su falta de flexibilidad para ajustar los márgenes de seguridad a las probabilidades reales de carga.

AASHTO LRFD 2024

La AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2024) introduce un enfoque más moderno y preciso para el diseño de puentes, conocido como el Método de Diseño por Factores de Resistencia (LRFD). Este enfoque se basa en la probabilidad y la estadística, lo que permite adaptar los factores de carga y resistencia a la variabilidad inherente de las cargas y las propiedades de los materiales.

El LRFD mejora la seguridad estructural al considerar las incertidumbres de las cargas y resistencias, utilizando factores de carga variables que se ajustan según la probabilidad de ocurrencia de las mismas. Además, este enfoque optimiza el uso de materiales, ya que ajusta la cantidad de refuerzo y hormigón a las necesidades reales de la estructura, lo que puede resultar en una reducción de costos a largo plazo.

AASHTO Standard 1996 y AASHTO LRFD 2024

Método de Diseño:

La normativa AASHTO Standard 1996 emplea el método de Diseño por Factores de Carga (LFD), basado en el estado límite de resistencia última, donde se aplican coeficientes de mayoración a las cargas (γ) y factores de reducción Φ a la capacidad de los materiales, diferenciándose del enfoque determinista de tensiones admisibles.

AASHTO LRFD 2024 utiliza el Método de Resistencia y Carga (LRFD), basado en un enfoque probabilístico, con factores de carga adaptativos y ajustes según probabilidades.

Cálculo de Cargas y Resistencias:

LFD Utiliza factores de carga y resistencia fijos y empíricos (basados en experiencia), los cuales no consideran la variabilidad estadística real, resultando en un índice de seguridad que no es uniforme para todos los elementos.

LRFD ajusta las cargas y resistencias en función de la probabilidad de que ocurran ciertos eventos, lo que permite un diseño más optimizado y seguro.

- **Seguridad Estructural:**

AASHTO Standard 1996 Proporciona un nivel de seguridad variable. Para luces medias (20-25m), el modelo de carga (HS-20) suele ser menos exigente, resultando en diseños con menor cuantía de acero, pero con menor redundancia frente al tráfico pesado actual.

AASHTO LRFD 2024 optimiza la seguridad al considerar incertidumbres y ajusta los márgenes de seguridad a las condiciones reales de carga y resistencia, Aunque el diseño resulta más robusto y a menudo requiere mayor consumo de materiales (debido al modelo HL-93 más pesado), asegura que el puente no fallará bajo las cargas extremas del tráfico moderno.

- **Eficiencia Económica:**

AASHTO Standard 1996 Puede parecer más económica inicialmente debido a un modelo de carga menos exigente (HS20), lo que resulta en menores cantidades de acero de refuerzo. Sin embargo, esta aparente economía puede derivar en mayores

costos de mantenimiento a largo plazo al no estar diseñada para las demandas de tráfico actuales.

AASHTO LRFD 2024 Busca la eficiencia mediante la optimización del uso de materiales según el riesgo real. Aunque suele requerir mayor inversión inicial en materiales (modelo HL-93 más pesado), ofrece una estructura con mayor vida útil y menores costos operativos, equilibrando la seguridad con la rentabilidad a largo plazo.

Análisis Técnico-Económico en el Contexto Ecuatoriano

En Ecuador, muchos de los puentes construidos antes del año 2000 fueron diseñados utilizando la AASHTO Standard 1996 estos puentes aun en funcionamiento podrían beneficiarse de una revisión bajo la normativa AASHTO LRFD 2024 en el diseño de sus vigas este nuevo método promete ser más eficiente en términos de seguridad. En el Ecuador donde las condiciones sísmicas y geográficas deben ser cuidadosamente consideradas, el uso de LRFD podría mejorar la respuesta estructural frente a eventos sísmicos.

CAPÍTULO 3

3.1 AASHTO LRFD 2024

3.1.1 Filosofía de Diseño: Estados Límite

El diseño de puentes bajo la normativa AASHTO LRFD (Load and Resistance Factor Design) se basa en una filosofía de seguridad probabilística a diferencia de los métodos de esfuerzos permisibles este enfoque busca garantizar que la resistencia nominal de los componentes de la estructura, ajustada por factores de reducción Φ sea siempre igual o mayor a los efectos de las cargas mayoradas por coeficientes estadísticos γ

De acuerdo con lo establecido en el artículo 1.3.2 de la norma un estado límite se define como la condición más allá de la cual un componente o la estructura completa deja de satisfacer los requisitos para los cuales fue diseñada.

Diseño LRFD

Tipología estructural

En base a la tabla 4.6.2.1-1 Superestructura de tablero comunes, selecciono la tipología estructural de mi puente la cual es Viga T de concreto fundido en sitio – Concreto Monolítico - Caso (e)

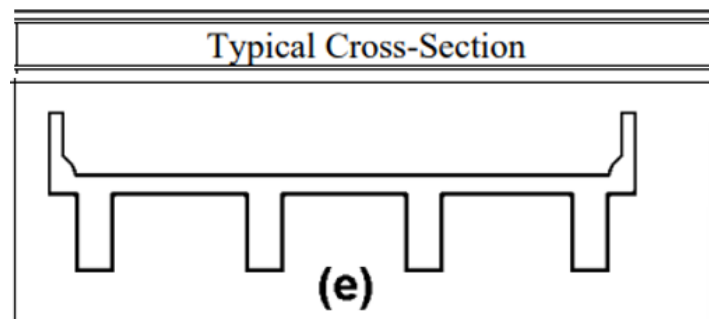


Ilustración 1 Tipología Estructural AASHTO LRFD

Fuente: Tabla 4.6.2.1-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Losa de Tablero de Concreto

En base al Art 9.7.1.1 el espesor de un tablero de hormigón no debe ser menor a 7 pulgadas 17.78 centímetros y el recubrimiento mínimo estará de acuerdo con las disposiciones del artículo 5.10.1 que nos indica que el recubrimiento no debe ser menor al especificado en la tabla 5.10.1-1 donde obtenemos la categoría y su recubrimiento

- Espesor mínimo (ts): 7 in
- Categoría A: Condición de Exposición Moderada
- Severa a moderada exposición - Otros casos diferentes a los anteriores: 2 pulgadas 5 cm

Situation	Reinforcing Material Category		
	A	B	C
Severe to Moderate Exposure			
Direct exposure to salt water	4.0	2.5	2.5
Cast against earth	3.0	2.0	2.0
Coastal	3.0	2.0	2.0
Exposure to deicing salts	2.5	2.0	1.5
Deck surfaces subject to tire stud or chain wear	2.5	2.5	2.0
Other than noted above	2.0	2.0	1.5

Tabla 2 Mínimo Recubrimiento para Refuerzo AASHTO LRFD

Fuente: Tabla 5.10.1-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Para calcular el espaciamiento máximo entre vigas el artículo 5.12.3.4 nos indica que el espesor de las alas superiores que sirven como losas de tablero no será menor que el mayor de los siguientes

- El determinado en la Sección 9
- El requerido para el anclaje y recubrimiento para preesfuerzo transversal, si se utiliza
- La luz libre entre filetes (chaflanes), cartelas o almas dividida por 20, a menos que se utilicen nervaduras transversales con un espaciamiento igual a la luz libre o se proporcione preesfuerzo transversal

$$h \geq \frac{S_{libre}}{20} \rightarrow S_{libre} \leq h * 20$$

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Altura mínima vigas

En base a la tabla 2.5.2.6.3-1 se establece la altura mínima para el tipo de Viga T de vanos simples de concreto reforzado la altura (h) incluyendo el espesor de la losa se calculará de acuerdo con:

$$h_{min} = 0.07 * L$$

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

De acuerdo con el artículo c2.5.2.6.3 el control de deflexiones en puentes de vigas de concreto reforzado establece que a mayor peralte efectivo (d) aumenta el momento de inercia de la sección transversal, esto reduce las deflexiones instantáneas y las producidas a largo plazo, en el caso de vigas T mantener un peralte indicado evita la fisuración excesiva de las zonas de tracción garantizando que las deformaciones se mantengan dentro de los límites $L/800$ para carga viva.

		Minimum Depth (Including Deck)	
Superstructure		When variable depth members are used, values may be adjusted to account for changes in relative stiffness of positive and negative moment sections	
Material	Type	Simple Spans	Continuous Spans
Reinforced Concrete	Slabs with Main Reinforcement Parallel to Traffic	$\frac{1.2(S+10)}{30}$	$\frac{S+10}{30} \geq 0.54 \text{ ft}$
	T-Beams	$0.070L$	$0.065L$
	Box Beams	$0.060L$	$0.055L$
	Pedestrian Structure Beams	$0.035L$	$0.033L$
Prestressed Concrete	Slabs	$0.030L \geq 6.5 \text{ in.}$	$0.027L \geq 6.5 \text{ in.}$
	CIP Box Beams	$0.045L$	$0.040L$
	Precast I-Beams	$0.045L$	$0.040L$
	Pedestrian Structure Beams	$0.033L$	$0.030L$
	Adjacent Box Beams	$0.030L$	$0.025L$

Tabla 3 Mínima profundidad tradicional para superestructuras AASHTO LRFD

Fuente: Tabla 2.5.2.6.3-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Ancho del alma

En base al artículo 5.12.3.5.1 el espesor del alma debe cumplir con 4 requisitos la resistencia al corte, la resistencia a la torsión, el espacio suficiente de recubrimiento para que proteja al acero de la corrosión y el alma debe ser lo suficientemente ancha para que el hormigón se compacte correctamente en el elemento.

Conforme al artículo 5.12.5.3.11b Espesor Mínimo del alma se lo calculara conforme al literal Almas sin tendones de postensado longitudinales y verticales

$$b_w = 8 \text{ in} = 20.3 \text{ cm}$$

Siguiendo lo sugerido en el artículo C5.12.3.5.1c, se optó por una dimensión mayor al mínimo legal para facilitar la colocación y consolidación del concreto. Un mayor ancho al mínimo nos asegura que el vibrado del hormigón sea eficiente, evitando así la formación de cangrejas o vacíos, especialmente en vigas con alta cantidad de armadura longitudinal.

Factores de Distribución para momento en vigas Interiores

En el diseño LRFD, el reparto de cargas hacia las vigas individuales es más preciso y depende de la rigidez del sistema. Para vigas tipo T de hormigón armado, las ecuaciones se seleccionan de la Tabla 4.6.2.2b-1.

Rango de Aplicabilidad

En base a la Tabla 4.6.2.2b-1 nos indican los rangos de aplicabilidad para el diseño:

Espaciamiento entre vigas (S):

$$3.5 \text{ ft} \leq S \leq 16.0 \text{ ft}$$

$$1.10 \text{ m} \leq S \leq 4.90 \text{ m}$$

Espesor de la losa (ts):

$$4.5 \text{ in} \leq t_s \leq 12.0 \text{ in}$$

$$11 \text{ cm} \leq t_s \leq 30 \text{ cm}$$

Longitud del tramo (L)

$$20 \text{ ft} \leq L \leq 240 \text{ ft}$$

$$6 \text{ m} \leq L \leq 73 \text{ m}$$

Número de vigas (Nb):

$$Nb = 3$$

Type of Superstructure	Applicable Cross-Section from Table 4.6.2.2.1-1	Distribution Factors	Range of Applicability
Concrete Deck or Filled Grid, Partially Filled Grid, or Unfilled Grid Deck Composite with Reinforced Concrete Slab on Steel or Concrete Beams; Concrete T-Beams, T- and Double T-Sections	(a), (e), (k); also (i) and (j) if sufficiently connected to act as a unit	One Design Lane Loaded: $0.06 + \left(\frac{S}{14}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{12.0 L t_s^3}\right)^{0.1}$	$3.5 \leq S \leq 16.0$ $4.5 \leq t_s \leq 12.0$ $20 \leq L \leq 240$ $N_b \geq 4$
		Two or More Design Lanes Loaded: $0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12.0 L t_s^3}\right)^{0.1}$	$10,000 \leq K_g \leq 7,000,000$
		use lesser of the values obtained from the equation above with $N_b = 3$ or the lever rule	$N_b = 3$

Tabla 4 Factores de Distribución para momento en vigas Interiores AASHTO LRFD

Fuente: Tabla 4.6.2.2.2b-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Factores de Distribución

- 1 carril de diseño cargado:

$$FD1 = 0.06 + \left(\frac{S}{14}\right)^{0.4} * \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} * \left(\frac{Kg}{L * ts^3}\right)^{0.1}$$

- 2 o más Carriles de diseño cargados:

$$FD2 = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} * \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} * \left(\frac{Kg}{12 * L * ts^3}\right)^{0.1}$$

S: Separación entre vigas

L: Longitud de la viga.

ts: Espesor de la losa

Kg: Parámetro de rigidez longitudinal.

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Nota: Para el cálculo de los factores de distribución al contar solo con 3 vigas transversales se procede con el artículo 4.6.2.2.2 que nos indica que el factor de distribución se determinara con el menor de los valores obtenido al comparar la aplicación de las ecuaciones empíricas y el método de la ley de momentos (Lever Rule)

Ley de Momentos: La Ley de Momentos (Lever Rule) es un procedimiento analítico basado en el equilibrio estático para la determinación de los factores de distribución de carga viva. Este método consiste en determinar la reacción en los apoyos (vigas) mediante la sumatoria de momentos, considerando que el tablero se encuentra articulado en las vigas interiores.

Cargas Vivas

Gravitacionales LL - Sobrecarga Vehicular (LL)

Conforme a la especificación AASHTO LRFD (art 3.6.1.2) la carga viva vehicular de diseño se modela bajo la designación HL-93 Este modelo de carga se compone de la superposición de 2 sistemas:

Vehículo de Diseño: Se evaluará el efecto más desfavorable entre:

- Camión de Diseño: Configuración de tres ejes con espaciamiento posterior variable (14.0 a 30.0 pies) aplicando el factor de Impacto Correspondiente.

Camión HL-93:

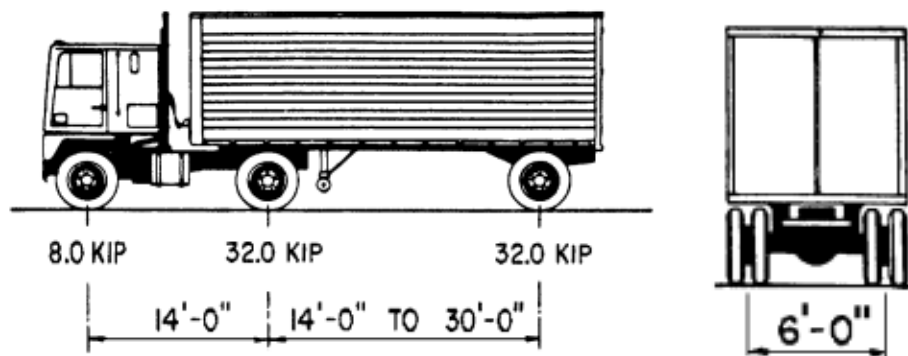
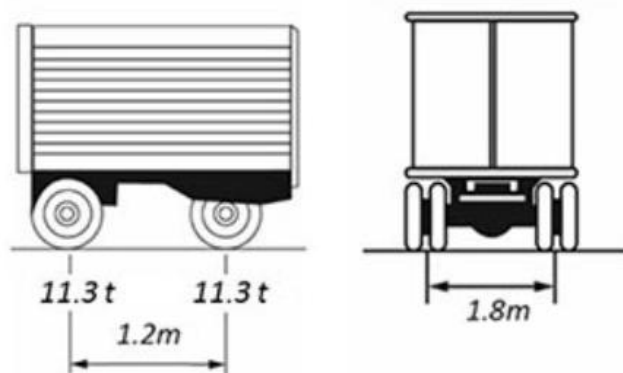


Ilustración 2 camión HL-93 AASHTO LRFD

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

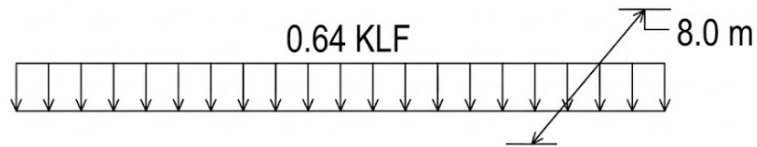
- **Tándem de Diseño:** Par de ejes de 25.0 kips con una separación longitudinal fija de 4.0 pies.



Tándem de Diseño AASHTO LRFD Bridge

Ilustración 3 Tándem de Diseño AASHTO LRFD

- **Carga de Carril de Diseño:** Una carga uniformemente distribuida de 0.64 klf en dirección longitudinal y 10.0 pies en dirección transversal.



CARGA DE CARRIL

Ilustración 4 Carga de Carril AASHTO LRFD

1. Factores de Amplificación y factor de presencia múltiple

Factores de presencia múltiple tabla 3.6.1.1.2 estos factores nos sirven para considerar la probabilidad de que uno o varios carriles se encuentren totalmente llenos de tráfico vehicular:

<i>Factores de Presencia Múltiple (m)</i>	
Número de Carriles Cargados	Factor de Presencia Múltiple (m)
1	1.2
2	1
3	0.85
>3	0.65

Tabla 5 Factores de presencia Múltiple) AASHTO LRFD

Fuente: Tabla 3.6.1.1.2-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Elección del factor de presencia múltiple:

- En el caso de un carril cargado, el factor de presencia múltiple de 1.20 se debe multiplicar al efecto que se analice (corte, momento, deflexiones, entre otros)
- En el caso de dos o más carriles cargados, el factor de presencia múltiple indicado en la tabla anterior se deberá aplicar al efecto que se analice (corte momento, deflexiones, entre otros)

Elección del Porcentaje de Impacto IM:

En la normativa AASHTO LRFD en base a la tabla 3.6.2.1-1, se aplican valores porcentuales fijos de Impacto según el estado límite y el componente evaluado. Este incremento se aplica exclusivamente a los camiones de diseño (o tándem), excluyendo explícitamente a la carga de carril, ya que se considera que esta carga distribuida no genera efectos dinámicos significativos.

IM	
<i>Componente</i>	<i>IM</i>
Juntas de tablero - Todos los Estados Límite	75%
<i>Todos los demás Componentes:</i>	
Estado Limite de Fatiga y Fractura	15%
Todos los demás estados Límite	33%

Tabla 6 Impacto Tabla 3.6.2.1-1 AASHTO LRFD

Fuente: Tabla 3.6.2.1-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Cargas Permanentes (3.5 LRFD)

DC = Carga Muerta de los componentes estructurales y elementos adjuntos no estructurales

Se define como el peso propio de los componentes estructurales del puente a todo elemento que cumpla una función estructural:

(Tableros, vigas, barreras de tráfico, Estribos, Pilas)

Igualmente corresponde a elementos adjuntos no estructurales como:

- Recubrimientos en los elementos mencionados (enlucidos - pinturas anticorrosivas)
- Tipos de pavimentos como adoquines en las veredas

DW = Carga debido a superficies sujetas a desgaste y utilidades

Esta carga corresponde a los recubrimientos que se van a utilizar en el puente sobre los cuales va a transitar el tráfico.

Se selecciono una protección TL-4 siguiendo las recomendaciones del artículo C13.7.2 nos indica que para vías donde las velocidades son altas más de 45mph las barreras TL-4 están diseñadas para resistir el impacto de vehículos ligeros y camiones unitarios pesados por lo que la TL-4 nos da una mayor seguridad que la barrera TL-3

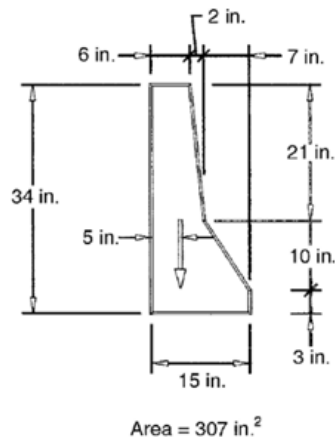


Ilustración 5 Barrera New Jersey TL-4

Se selecciono una protección TL-4 siguiendo las recomendaciones del artículo C13.7.2 nos indica que para vías donde las velocidades son altas más de 45mph las barreras TL-4 están diseñadas para resistir el impacto de vehículos ligeros y camiones unitarios pesados por lo que la TL-4 nos da una mayor seguridad que la barrera TL-3

	Vehicle Characteristics	Small Automobiles		Pickup Truck	Single-Unit Van Truck	Van-Type Tractor-Trailer		Tractor-Tanker Trailer
NCHRP Report 350	<i>W</i> (kips)	1.55	1.8	4.5	18.0	50.0	80.0	80.0
	<i>B</i> (ft)	5.5	5.5	6.5	7.5	8.0	8.0	8.0
	<i>G</i> (in.)	22	22	27	49	64	73	81
	Crash angle, θ	20°	20°	25°	15°	15°	15°	15°
	Test Level	Test Speeds (mph)						
	TL-1	30	30	30	N/A	N/A	N/A	N/A
	TL-2	45	45	45	N/A	N/A	N/A	N/A
	TL-3	60	60	60	N/A	N/A	N/A	N/A
	TL-4	60	60	60	50	N/A	N/A	N/A
	TL-5	60	60	60	N/A	N/A	50	N/A
	TL-6	60	60	60	N/A	N/A	N/A	50

Tabla 7 Ensayo de impacto en barandas de puentes

Fuente: Tabla 13.7.2-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

LRFD (Load and Resistance Factor Design)

El artículo 1.3.2.1 estados límites de desempeño nos indica que cada componente y conexión del puente debe satisfacer la ecuación 1.3.2.1-1 para cada estado límite.

$$\sum \eta_i * \gamma_i * Q_i \leq \phi * R_n$$

η_i = *Modificador de Carga*

γ_i = *Factor de Carga*

Q_i = *Carga real*

ϕ = *Factor de reduccion de Resistencia*

R_n = *Resistencia Nominal*

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Estado Limite de Resistencia I este representa la combinación básica de cargas para el uso normal de un puente esta condición crítica verifica que el puente pueda soportar el tráfico vehicular pesado esperado más su peso propio durante su vida útil garantizando la seguridad

En las tablas 3.4.1-1 y 3.4.1-2 se seleccionarán los valores específicos para cada caso de Resistencia en nuestro caso Resistencia I

Load Combination Limit State	DC DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	DR	Use One of These at a Time				
											EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	γ_{TU}	γ_{TG}	γ_{SE}	γ_{DR}	—	—	—	—	—

Tabla 8 Combinaciones de Carga y Factores de Carga

Fuente: Tabla 3.4.1-1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Type of Load, Foundation Type	Load Factor	
	Maximum	Minimum
<i>DC</i> : Component and Attachments	1.25	0.90
<i>DC</i> : Strength IV only	1.50	0.90
<i>DW</i> : Wearing Surfaces and Utilities	1.50	0.65

Tabla 9 Factores de Carga para Cargas Permanentes

Fuente: Tabla 3.4.1-2 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024)

Diseño a flexión Vigas AASHTO LRFD 2024

Se realizó el diseño de vigas en S-Math para indicar los pasos que se siguieron para diseñar el código de Python

AASHTO LRFD 2024

Diseño de vigas simplemente apoyadas en hormigón armado

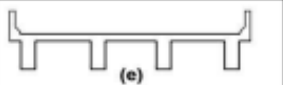
DIMENSIONES

$L := 25 \text{ m}$
 $Ancho := 8 \text{ m}$

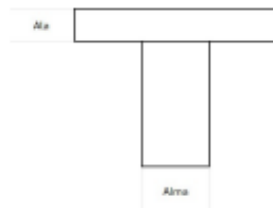
Materiales

$f_c := 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
 $f_y := 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Tipología Estructural (4.6.2.2.1.1)

	Cast-in-Place Concrete T-Beam	Monolithic concrete	
Caso (e)			

Los puentes de vigas de Hormigón armado con tablero de hormigón armado son señalados en la norma AASHTO LRFD como puentes en Base a Vigas T de hormigón armado



1. Espesor Mínimo para Losas de Concreto

1 pulg $\approx 2.5 \text{ cm}$ - con fines de prediseño
 9.7.1.1 - no debe ser menor a 7 pulgadas = 17.5 cm

$17.5 \text{ cm} \approx 18 \text{ cm}$ $E_{min} := 18 \text{ cm}$

Espesor Despreciable (Fenomenos de desgaste)

$0.5 \cdot 2.5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

con fines de prediseño asumiremos este espesor como

$ED := 2 \text{ cm}$

Espesor Mínimo Estructural + Espesor de Desgaste

$t := E_{min} + ED = 20 \text{ cm}$

2. DIMENSIONAMIENTO VIGA T

5.12.3.5

Espesor $\geq$ Espaciamiento entre vigas(eje a eje)/20

Espesor $\geq S/20$

$S \leq \text{Espesor} \cdot 20$

$S := t \cdot 20 = 400 \text{ cm}$ (Espaciamiento maximo entre vigas)

Numero de Vigas

Ancho del Tablero / Espaciamiento entre vigas

$nb := \frac{\text{Ancho}}{S} = 2$ (Vigas)

Para puentes Vehiculares para evitar fenómenos de volcamiento se recomienda almenos tres vigas

$nv := 3$ (Vigas)

Longitud del Voladizo 4.6.2.2d-1

Type of Superstructure	Applicable Cross-Section from Table 4.6.2.2.1-1	Distribution Factors	Range of Applicability
Concrete Deck or Filled Grid, Partially Filled Grid, or Unfilled Grid Deck; Composite with Reinforced Concrete Slab on Steel or Concrete Beams; Concrete T-Beams, T- and Double T-Sections	(a), (e), (k); also (i) and (j) if sufficiently connected to act as a unit	One Design Lane Loaded: $0.06 + \left(\frac{S}{14} \right) \left(\frac{S}{L} \right) \left(\frac{K_r}{12.0 L_t} \right)^{0.1}$ Two or More Design Lanes Loaded: $0.075 + \left(\frac{S}{9.5} \right) \left(\frac{S}{L} \right) \left(\frac{K_r}{12.0 L_t} \right)^{0.1}$ use lesser of the values obtained from the equation above with $N_b = 3$ or the lever rule	$3.5 \leq S \leq 16.0$ $4.5 \leq L_t \leq 12.0$ $20 \leq L \leq 240$ $N_b \geq 4$ $10,000 \leq K_r \leq 7,000,000$ $N_b = 3$

El voladizo no puede superar los 5.5 pies

$5.5 \cdot 0.3048 \text{ m} = 1.6764 \text{ m}$

De forma práctica y con un criterio económico se puede limitar el voladizo del tablero a 100cm

$L_{\text{voladizo}} := 1 \text{ m}$

Nuevo espaciamento entre vigas

$S = \text{Ancho total} - 2 \text{ voladizos} / \# \text{ espacios entre vigas}$

$S_{\text{nuevo}} := \frac{\text{Ancho} - 2 \cdot L_{\text{voladizo}}}{2} = 3 \text{ m}$

Predimensionamiento Viga principal (Art 2.5.2.6.3 AASHTO LRFD 2024)

$h_{min} := 0.070 \cdot L$

$h_{min} = 1.75 \text{ m}$

		Minimum Depth (Including Deck)	
Superstructure		When variable depth members are used, values may be adjusted to account for changes in relative stiffness of positive and negative moment sections	
Material	Type	Simple Spans	Continuous Spans
Reinforced Concrete	Slabs with Main Reinforcement Parallel to Traffic	$\frac{1.2(S+10)}{30}$	$\frac{S+10}{30} \geq 0.54 \text{ ft}$
	T-Beams	$0.070L$	$0.065L$
	Box Beams	$0.060L$	$0.055L$
	Pedestrian Structure Beams	$0.035L$	$0.033L$

Ilustración 6 Dimensionamiento Viga T

Predimensionamiento de la Losa (9.7.1.1 AASHTO LRFD 2024)

$h_{min} = 1.75 \text{ m}$ considerando estos datos la altura del alma de la viga por si sola seria de

$$t = 0.2 \text{ m} \quad alma := h_{min} - t = 1.55 \text{ m}$$

Ancho del Alma (5.12.3.4.1c)

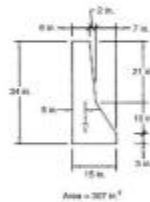
$$b_{w_{min}} := 8 \cdot 2.5 \text{ cm} = 0.2 \text{ m}$$

bw min Ancho minimo de alma normativo debido a la longitud del puente este ancho es inviable para el prediseño por lo que se considera un valor mas real de punto de partida:

$$b_w := 0.4 \text{ m}$$

$$Area := alma \cdot b_w = 0.62 \text{ m}^2 \quad I := \frac{b_w \cdot alma^3}{12} = 0.1241 \text{ m}^4$$

Presencia de Protecciones



$$TL = 4$$

$$Area_{T1} := 1980 \text{ cm}^2$$

$$Area_{T2} = 0.198 \text{ m}^2$$

3. Factores De Distribucion para momento en Vigas interiores (Tabla 4.6.2.2.2.b-1)

Type of Superstructure	Applicable Cross-Section Data (Table 4.6.2.2.1-1)	Distribution Factors
Concrete Deck or Filled Grid, Partially Filled Grid, or Unfilled Grid Deck	(a), (c), (d), also (i) and (j) if sufficiently connected to act as a unit	One Design Lane Loaded: $0.06 + \left(\frac{S}{14} \right) \left(\frac{S}{L} \right) \left(\frac{K_L}{12.0 L} \right)^{0.5}$
Composite with Reinforced Concrete Slab on Steel or Concrete Beams; Concrete T-Beams, I- and Double T-Sections		Two or More Design Lanes Loaded: $0.075 + \left(\frac{S}{8.5} \right) \left(\frac{S}{L} \right) \left(\frac{K_L}{12.0 L} \right)^{0.5}$
		use lesser of the values obtained from the equation above with $N_L = 3$ or the lever rule

Un carril de Diseño Cargado

$$S_{nuevo} = 9.8425 \text{ ft}$$

$$L = 82.021 \text{ ft}$$

$$t = 7.874 \text{ in}$$

$$I = 298221.5158 \text{ in}^4$$

$$n := 1 \quad \text{Mismo hormigon en losa y viga}$$

$$Area = 961.0019 \text{ in}^2$$

$$eg := \frac{t}{2} + \frac{alma}{2} = 34.4488 \text{ in}$$

Ilustración 7 Factores de Distribución LRFD

Rigidez Longitudinal

$$K_g := n \cdot \left(I + Area \cdot e_g^2 \right) = 1438662.7963 \text{ in}^4$$

$$mg_{cs} := 0.06 + \left(\frac{S_{nuevo}}{14} \right)^{0.4} \cdot \left(\frac{S_{nuevo}}{L} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{\frac{K_g}{4}}{12 \cdot \frac{L}{ft} \left(\frac{t}{in} \right)} \right)^{0.1} = 0.5731$$

Dos o mas Carriles Cargados

$$mg_{cs2} := 0.075 + \left(\frac{S_{nuevo}}{9.5} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{S_{nuevo}}{L} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{\frac{K_g}{4}}{12 \cdot \frac{L}{ft} \left(\frac{t}{in} \right)} \right)^{0.1} = 0.8209$$

Solo para el caso de Puentes con 3 vigas se considera el menor

$$Mg_{cs.int} := mg_{cs} = 0.5731 \quad (\text{Predomina})$$

Ley de Momentos (lever rule)

Un Carril Cargado

$$S_{nuevo} = 3 \text{ m}$$

$$L_{voladizo} = 1 \text{ m}$$

$$d_{borde} := 0.6 \text{ m} \quad \text{La primera rueda se coloca a 0.6m del bordillo}$$

$$d_{carril} := 1.8 \text{ m}$$

$$p := 1$$

$$R_{int1} := 0.5 \cdot 1 + 0.5 \cdot \frac{S_{nuevo} - d_{carril}}{S_{nuevo}} = 0.7$$

$$mg_{int1} := R_{int1} \cdot 1.2 = 0.84$$

Dos Carriles Cargados

$$R_{int2} := \frac{p}{2} \cdot \frac{S_{nuevo} - d_{borde}}{S_{nuevo}} + \frac{p}{2} \cdot \frac{S_{nuevo} - (d_{borde} + d_{carril})}{S_{nuevo}} = 0.5$$

$$mg_{int2} := R_{int2} \cdot 2 = 1$$

Valores con Formulas (Predomina el Menor) Valores con ley de momentos (Predomina el Mayor)

$$mg_{cs} = 0.5731$$

$$mg_{int1} = 0.84$$

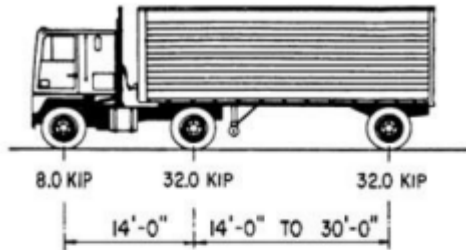
$$mg_{cs2} = 0.8209$$

$$mg_{int2} = 1$$

Predomina el mayor entre los 2 grupos: $FD := mg_{cs2} = 0.8209$

HL-93

Camion



$$p3 := 3.63 \text{ tonne}$$

$$p2 := 14.52 \text{ tonne}$$

$$p1 := 14.52 \text{ tonne}$$

$$R_{total} := p1 + p2 + p3 = 32.67 \text{ tonne}$$

$$x := 13.2115 \text{ m}$$

$$y1 := \frac{x \cdot (L - x)}{L} = 6.23 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L - x} \cdot (L - x - 4.27 \text{ m}) = 3.97 \text{ m}$$

$$y3 := \frac{y1}{x} \cdot (x - 4.27 \text{ m}) = 4.22 \text{ m}$$

$$M_{camion} := (p1 \cdot y1) + (y2 \cdot p2) + (y3 \cdot p3) = 163.4523 \text{ tonne m}$$

Tandem

$$x2 := 12.8048 \text{ m}$$

$$Pt1 := 11.34 \text{ tonne}$$

$$Pt2 := 11.34 \text{ tonne}$$

$$yt1 := \frac{x2 \cdot (L - x2)}{L} = 6.2463 \text{ m}$$

$$yt2 := \frac{yt1}{L - x} \cdot (L - x - 1.2 \text{ m}) = 5.6104 \text{ m}$$

$$M_{tandem} := Pt1 \cdot yt1 + Pt2 \cdot yt2 = 134.4553 \text{ tonne m}$$

Uso momento Camion

$$w_{carril} := 0.952 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

$$M_{carril} := \frac{w_{carril} \cdot L^2}{8} = 74.375 \text{ tonne m}$$

$$M_{LL_IM} := M_{carril} + M_{camion} \cdot \left(1 + \frac{33}{100}\right) = 291.7666 \text{ tonne m}$$

$$M_{LLIM_INT} := FD \cdot M_{LL_IM} = 239.517 \text{ tonne m} \quad \text{Momento por carga Viva que actua en la viga}$$

4. Factor de Distribución para carga en vigas exteriores

Un carril Cargado

$$ancho_barrera := 0.381 \text{ m}$$

$$de := L_voladizo - ancho_barrera = 0.619 \text{ m}$$

$$d_{ft} := \frac{de}{0.3048 \text{ m}} = 2.0308$$

$$R_{ext1} := \frac{0.5 \cdot (S_nuevo + de - 0.6 \text{ m}) + 0.5 \cdot (S_nuevo + de - 0.6 \text{ m} - 1.8 \text{ m})}{S_nuevo} = 0.7063$$

$$mg_{ext1} := 1.2 \cdot R_{ext1} = 0.8476$$

2 o Mas Carriles Cargados

$$e_1 := 0.77 + \left(\frac{d_{ft}}{9.1} \right) = 0.9932$$

$$g := e_1 \cdot mg_{cs2} = 0.8153$$

$g = e \cdot g_{interior}$
$e = 0.77 + \frac{d_e}{9.1}$
use lesser of the values obtained from the equation above with $N_b = 3$ or the lever rule

Solo analisis viga Interior

Análisis Cargas Muertas

$$Y_{hormigon} := 2.4 \frac{\text{tonne}}{\text{m}} \quad Y_{asfalto} := 2.2 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

$$hmin = 1.75 \text{ m}$$

$$t = 0.2 \text{ m}$$

$$bw = 0.4 \text{ m}$$

Losa

$$w_{losa} := (S_nuevo \cdot t) \cdot Y_{hormigon} = 1.44 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Alma

$$w_{alma} := (bw \cdot hmin) \cdot Y_{hormigon} = 1.68 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Carpeta Asfáltica

$$h_{asf} := 8 \text{ cm} = 0.08 \text{ m}$$

$$W_{c_asf} := Y_{asfalto} \cdot h_{asf} \cdot S_nuevo = 0.528 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Peso Barrera

$$w_{barrera} := 2 \cdot Area_{TI} \cdot \gamma_{hormigon} = 0.9504 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Carga Componentes Estructurales

$$W_{DC} := w_{losa} + w_{alma} + \frac{w_{barrera}}{nV} = 3.4368 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Carga superficies sujetas a desgaste y utilidad

$$W_{DW} := W_{c_asf} = 0.528 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Se debe recordar que el efecto por carga viva es considerable por lo tanto se debe recordar el punto crítico donde se producía el máximo momento por carga viva:

Momento DC

$$M_{DC} := \frac{W_{DC} \cdot L^2}{8} = 268.5 \text{ tonne m}$$

Momento DW

$$M_{DW} := \frac{W_{DW} \cdot L^2}{8} = 41.25 \text{ tonne m}$$

Table 3.4.1-1—Load Combinations and Load Factors

Load Combination Limit State	DC DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	DR	Use One of These at a Time				
											EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_F	1.75	1.00	—	—	1.00	γ_{TU}	γ_{TG}	γ_{SE}	γ_{DR}	—	—	—	—	—

Table 3.4.1-2—Load Factors for Permanent Loads, γ_F

Type of Load, Foundation Type	Load Factor	
	Maximum	Minimum
DC: Component and Attachments	1.25	0.90
DC: Strength IV only	1.50	0.90

Factores de carga ASHTO LRFD (Tabla 3.4.1-1 y 3.4.1.2)

$$\gamma_{DC} := 1.25$$

$$\gamma_{DW} := 1.5$$

$$\gamma_{LL} := 1.75$$

$$\eta := 1$$

$$M_{U_{resistencia_1}} := \eta \cdot (\gamma_{DC} \cdot M_{DC}) + (\gamma_{DW} \cdot M_{DW}) + (\gamma_{LL} \cdot M_{LLIM_INT}) = 816.6548 \text{ tonne m}$$

Ilustración 8 Momento Resistencia 1

Calculo del Peralte preliminar

$$\phi := 0.9$$

$$estr := 1.2 \text{ cm}$$

$$d := hmin - 2 \text{ cm} - 4 \text{ cm} - estr = 1.678 \text{ m}$$

$$\frac{M_u}{\phi} = A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f'_c b} \right)$$

$$\frac{M_u}{\phi} = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$Mu_{resistencia_1} = 816.6548 \text{ tonne m}$$

j = fraccion de peralte preliminar se puede considerar entre 0.8 y 0.9

Para vigas de H.A se sugiere $j := 0.875$

$$As_{calc} := \frac{Mu_{resistencia_1}}{\phi \cdot f_y \cdot j \cdot d} = 147.1454 \text{ cm}^2$$

se utilizaran Varillas de N.- 32

$$db := 32 \text{ mm}$$

$$As_{32mm} := \frac{\pi \cdot db^2}{4} = 8.0425 \text{ cm}^2$$

$$N\#Varillas := \frac{As_{calc}}{As_{32mm}} = 18.3$$

Ubicacion del Refuerzo

Diametros Minimios (Tabla 5.10.2.3-1)

Table 5.10.2.3-2—Galvanized Bars—Minimum Finished Bend Diameter

Bar Size and Use	Minimum Finished Diameter
#3 through #6	$6.0d_b$
#7 through #8	$8.0d_b$
#9, #10, and #11	$8.0d_b$
#14 and #18	$10.0d_b^*$

Note that galvanized stirrups and ties cannot be bent to the tighter diameters noted in Table 5.10.2.3-1.

* Due to safety concerns, CRSI does not recommend bending bars larger than #14 with grade designation of Grade 75 or higher.

$$4 \cdot db = 12.8 \text{ cm}$$

Ilustración 9 As Necesario LRFD

5.10.3—Spacing of Reinforcement

5.10.3.1—Minimum Spacing of Reinforcing Bars

5.10.3.1.1—Cast-in-Place Concrete

For cast-in-place concrete, the clear distance between parallel bars in a layer shall not be less than the largest of the following:

- 1.5 times the nominal diameter of the bars;
- 1.5 times the maximum size of the coarse aggregate; or
- 1.5 in.

Espaciamiento Mínimo

$$Esp1 := 1.5 \cdot db = 4.8 \text{ cm}$$

$$Esp2 := 1.5 \cdot 2.54 \text{ cm} = 3.81 \text{ cm}$$

$$Esp3 := 3.81 \text{ cm}$$

$$ngrupos := 3$$

$$S_{min} := Esp1 = 4.8 \text{ cm}$$

$$nbar := 9$$

$$S_{calc} := \frac{bw - 2 \cdot 4 \text{ cm} - 2 \cdot (1.2) \text{ cm} - (ngrupos \cdot 2 \cdot db)}{ngrupos - 1} = 5.2 \text{ cm}$$

$$S_{min} < S_{calc} \quad \text{Se cumple espaciamento mínimo}$$

9 varillas por fila 3 varillas por paquete

$$d1 := h_{min} - 4 \text{ cm} - 1.2 \text{ cm} - (0.5 \cdot 3 \cdot db) = 165 \text{ cm}$$

$$d2 := d1 - (2 \cdot db) = 158.6 \text{ cm}$$

$$As_{capa} := nbar \cdot As_{32mm} = 72.38 \text{ cm}^2$$

$$\epsilon_s := \epsilon_c \cdot \frac{d - c}{c}$$

$$\epsilon_{s1} := 0.003 \cdot \frac{d1 - c}{c}$$

$$\epsilon_{s2} := 0.003 \cdot \frac{d2 - c}{c}$$

$$fc = 2.8 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\beta_{e1} := 0.85$$

$$b_{efect} := S_{nuevo} = 3 \text{ m}$$

$$Es := 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$c := \frac{4 \cdot As_{capa} \cdot fy}{0.85 \cdot fc \cdot \beta_{e1} \cdot b_{efect}} = 20.0366 \text{ cm}$$

$$\epsilon_{s1} := 0.003 \cdot \frac{d1 - c}{c} = 0.0217$$

Ilustración 10 Espaciamento Mínimo LRFD

$$\varepsilon_{s1} \geq 0.0021 \quad \text{Acero fluye antes de que falle el concreto}$$

$$a := \beta_1 c = 17.0311 \text{ cm}$$

$$M_n := \left(A_{s_{capa}} f_y \cdot \left(d_1 - \frac{a}{2} \right) \right) + \left(A_{s_{capa}} f_y \cdot \left(d_2 - \frac{a}{2} \right) \right) = 931.9867 \text{ tonne m}$$

$$M_n = 931.9867 \text{ tonne m}$$

$$M_u := \phi M_n = 838.788 \text{ tonne m}$$

$$M_{u_{resistencia_1}} = 816.6548 \text{ tonne m}$$

$$\phi M_n > M_{u_{resistencia_1}}$$

Ilustración 11 demanda vs Capacidad LRFD



Ilustración 12 Diagrama de Momento LRFD 2024

3.2. AASHTO STANDARD 1996

3.2.1. Filosofía de Diseño: Load Factor Design (LFD)

Para el desarrollo de la superestructura de este proyecto se optó por utilizar el método de Factores de Carga conocido como Load Factor Design (LFD), tal como lo especifica el Artículo 8.16 de la normativa AASHTO Standard 1996. A diferencia del método clásico de tensiones admisibles (ASD) este enfoque se basa en el estado límite de resistencia, lo cual permite tener una idea más clara de la seguridad al momento de la falla.

Básicamente el método introduce factores de mayoración de carga γ , β para cubrir la incertidumbre en las solicitaciones y factores de reducción de resistencia Φ que castigan la capacidad de los materiales. El objetivo principal es garantizar que la resistencia reducida de diseño (M_n , V_n) sea siempre superior a las fuerzas últimas (M_u , V_u) que actúan sobre la viga.

Prediseño Losa:

En base a la tabla 8.9.2 Profundidades Mínimas Recomendadas para Miembros de Profundidad Constante

Recommended Minimum Depths for Constant Depth Members		
Superstructure Type	Minimum Depth in Feet ^a	
	Simple Spans	Continuous Spans
Bridge slabs with main reinforcement parallel to traffic	$1.2(S + 10)/30$	$(S + 10)/30 \geq 0.542$
T-Girders	$0.070S$	$0.065S$
Box-Girders	$0.060S$	$0.055S$
Pedestrian Structure Girders	$0.033S$	$0.033S$

^a When variable depth members are used, values may be adjusted to account for change in relative stiffness of positive and negative moment sections.

S = span length as defined in Article 8.8 in feet.

Tabla 10 Profundidad Mínima Recomendada AASHTO Standard

Referencia: Tabla 8.9.2 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996)

Espesor del tablero

$$t \geq 0.1 + \frac{S_{entre\ vigas}}{30}$$

Altura total viga T

$$h_{min} = 0.070 * S$$

S = Longitud del tramo según se define en el artículo 8.8 en pies

Ancho Colaborante

En base al artículo 8.10.1.1 nos indica que el ancho efectivo b para vigas interiores debe ser el menor de:

- $\frac{L}{4}$ luz del tramo
- $S =$ Distancia centro a centro entre vigas
- 12 veces el espesor de la losa mas el ancho del alma

Y para vigas con volado según el artículo 8.10.1.2

- $\frac{L}{12}$ luz del tramo
- $6 * t$ Seis veces el espesor de la losa
- $\frac{S-bw}{2}$ Ni la mitad de la distancia libre a la viga adyacente
 - Referencia: Artículo 8.10.1.1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996)

Cargas Muerta

En base al artículo 3.3 la carga muerta consistirá en el peso de la estructura completa incluyendo la calzada, aceras, carril de bicicletas, barandas, tuberías, conductos, cables y otros el artículo 3.3.2 nos indica igualmente que de no tener el dato exacto del peso de los servicios públicos se deberá hacer una estimación razonable. Nos indica el código que para concreto armado se toma normalmente (150 lb/ft³) aproximadamente (2400 kg/m³)

Diafragmas

En base al artículo 8.12.2 para tramos de vigas T se deben colocar diafragmas intermedios entre las vigas a intervalos máximos de 40 ft (12.19 m) al pasar este límite 40 ft se opta por colocar diafragmas a los tercios de la luz cumpliendo con el artículo 8.12.3.

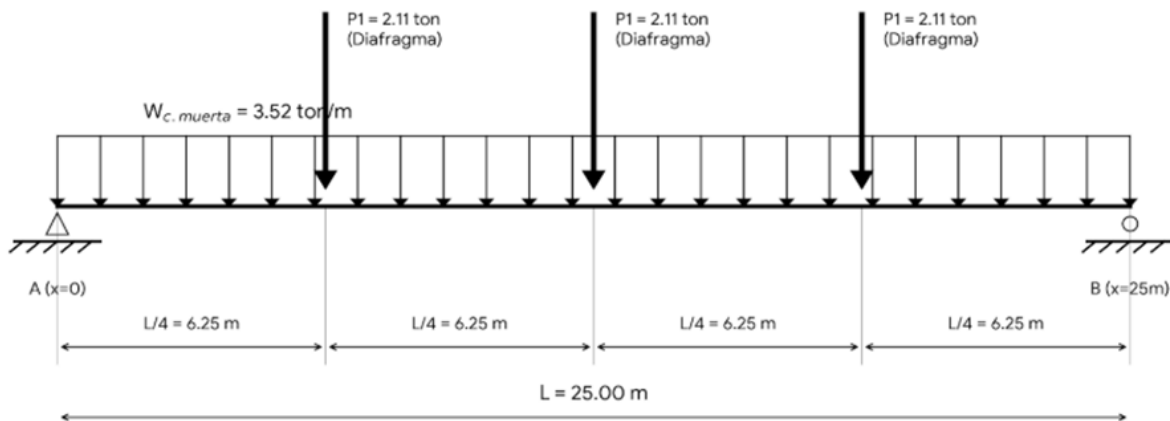


Ilustración 13 Diafragmas AASHTO Standard

Factores de Distribución

En base al artículo 3.23.1 Distribución de cargas a las vigas interiores en el calculo de momentos en vigas la fracción de la rueda que se aplicará a cada viga se determinará usando los coeficientes de la tabla 3.23.1

Para vigas exteriores en base al artículo 3.23.2.3 la carga muerta soportada por una viga exterior debe ser el peso de la sección de la losa que contribuye a ella las cargas se dividirán según lo indicado en el artículo 3.3.2 para la carga viva la viga exterior se diseñara aplicando la ley de la palanca o asegurándonos que no tenga menos capacidad que la viga interior.

Distribution of Wheel Loads in Longitudinal Beams		
Kind of Floor	Bridge Designed for One Traffic Lane	Bridge Designed for Two or more Traffic Lanes
On concrete T-Beams	$S/6.5$ If S exceeds 6' use footnote f.	$S/6.0$ If S exceeds 10' use footnote f.

Tabla 11 Factores de distribución de carga viva AASHTO Standard

Referencia: Tabla 3.23.1 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996)

Carga Viva

Para la carga móvil se utilizó el camión de diseño estándar HS20-44 especificado en el Artículo 3.7.4 de la norma. Este vehículo representa un camión tractor con semirremolque y tiene un peso total de 72 kips, lo que equivale a 32.6 toneladas.

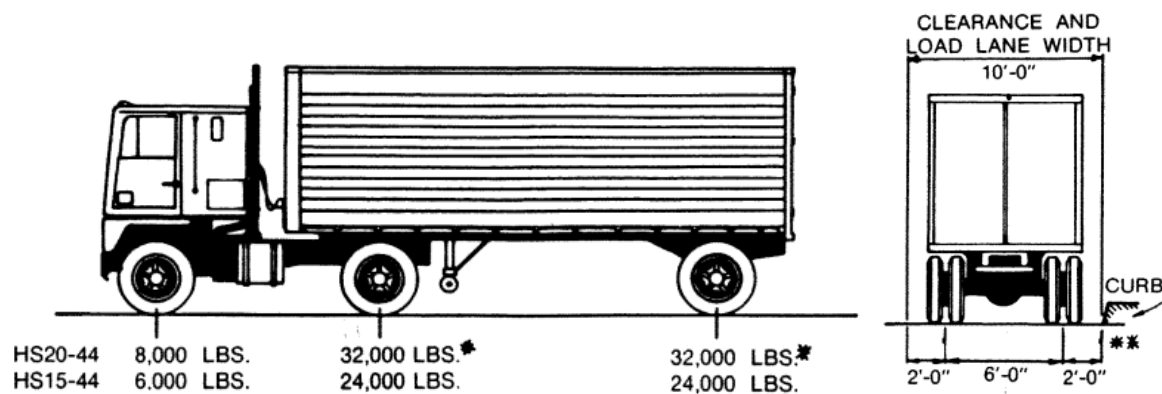


Ilustración 14 Camión HS20-44 AASHTO Standard

Referencia: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996)

Eje Delantero: 3.6 toneladas (8 kips).

Eje Motriz: 14.5 toneladas (32 kips).

Eje Trasero: 14.5 toneladas (32 kips).

Para obtener el momento máximo el código indica que el eje central y el trasero deben estar situados de tal forma que el centro del tramo quede a la mitad de la distancia entre el centro de gravedad de las cargas y el eje más cercano.

Carga de Carril

- El artículo 3.7.1.3 establece que se debe revisar la cara de carril la cual consiste en una carga uniforme distribuida de 640 lb*ft
- Una carga puntual para momento de 18 000lb colocada en el punto donde se produzca el mayo efecto

El código nos indica que se calculó el momento de camión y el momento de la carga de carril y se utilice el que resulte mayor

Nota: para luces grandes casi siempre predominara el camión HS20-44

Factor de Impacto (I)

Dado que el vehículo se mueve genera efectos dinámicos y vibraciones que aumentan los esfuerzos en la estructura para considerar esto se calculó el coeficiente de impacto

El artículo 3.8.2.1 nos indica que la cantidad de la asignación o incremento por impacto se expresa como una fracción del esfuerzo por carga viva y será determinado por la siguiente formula:

$$I = \frac{50}{L + 125}$$

Nota: la normativa nos indica que el impacto debe ser menor a 30%

Momento por Carga viva

$$M_{viga} = M_{HS20} * \frac{FD}{2} * (1 + I)$$

El camión tiene dos líneas de ruedas y las tablas de la norma vienen diseñadas para una sola. Al multiplicar el momento del camión por el factor FD y dividirlo para 2 se deja la carga exacta que le toca a cada viga y sumando el Impacto por el golpe del tráfico (impacto)

Referencia: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996)

Grupo 1 (Momento Último)

El Artículo 3.22.1 nos indica que la combinación más crítica para el diseño de superestructuras de puentes ya que integra las cargas permanentes D las cargas de tráfico sumándole su Impacto u los coeficientes aplicados asegurando un margen de seguridad ante posibles sobrecargas vehiculares durante la vida útil de la estructura

$$U = 1.3 * [D + 1.67 * (LL + I)]$$

$$\begin{aligned} \text{Group (N)} = & \gamma[\beta_D \cdot D + \beta_L (L + I) + \beta_C CF + \beta_E E \\ & + \beta_B B + \beta_S SF + \beta_W W + \beta_{WL} WL \\ & + \beta_L \cdot LF + \beta_R (R + S + T) \\ & + \beta_{EQ} EQ + \beta_{ICE} ICE] \end{aligned} \quad (3-10)$$

where,

- N = group number;
- γ = load factor, see Table 3.22.1A;
- β = coefficient, see Table 3.22.1A;
- D = dead load;
- L = live load;
- I = live load impact;
- E = earth pressure;
- B = buoyancy;
- W = wind load on structure;
- WL = wind load on live load—100 pounds per linear foot;
- LF = longitudinal force from live load;
- CF = centrifugal force;
- R = rib shortening;
- S = shrinkage;
- T = temperature;
- EQ = earthquake;
- SF = stream flow pressure;
- ICE = ice pressure.

Tabla 12 Grupo 1 AASHTO Standard

Referencia: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996)

3.10 Cuantía de Acero

(Art. 8.16.3) El diseño de la sección transversal se realizó considerando el aporte de la losa trabajando como una viga T. Se verificó primero si el eje neutro caía dentro del espesor de la losa o en el alma, confirmando que la sección trabaja bajo un comportamiento dúctil.

Para el cálculo de la resistencia, utilicé un factor de reducción de resistencia a flexión $\phi = 0.90$, tal como lo estipula el Artículo 8.16.1.2.2. Tras iterar la cantidad de acero necesaria para resistir los 733.59 ton·m, se determinó el uso de 15 varillas de 32 mm 120.637 cm^2 . Estas se distribuirán en capas en la parte inferior de la viga. Se verificó además que esta cuantía de acero es mayor al mínimo requerido por la norma 0.033, y menor a la cuantía balanceada, garantizando así una falla dúctil en caso de colapso.

Diseño LFD AASHTO 1996 – método programado en Python

Se realizó el diseño de Vigas en S-Math para indicar la metodología que se siguió para realizar el código en Python.

AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition (1996)

Puente de Hormigón Armado de 25m de largo y 8 metros de ancho

$$L := 25 \text{ m}$$

$$A := 8 \text{ m}$$

$$F_c := 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_y := 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$N_b := 3$$

Prediseño de La Losa (Espesor mínimo) Tabla 8.9.2 AASHTO 1996

Superstructure Type	Minimum Depth in Feet*	
	Simple Spans	Continuous Spans
Bridge slabs with main reinforcement parallel to traffic	$1.2(S + 10)/30$	$(S + 10)/30 \approx 0.542$
T-Girders	0.070S	0.065S
Box-Girders	0.060S	0.055S
Pedestrian Structure Girders	0.033S	0.033S

* When variable depth members are used, values may be adjusted to account for change in relative stiffness of positive and negative moment sections.
S = span length as defined in Article 8.8 in feet.

Losas de puente con refuerzo principal paralelo al tráfico

$$S := 3 \text{ m}$$

S = luz libre de centro de viga a centro viga

$$t \geq 0.10 + \frac{S}{30}$$

$$t := 0.10 \text{ m} + \frac{S}{30} - 0.2 \text{ m}$$

3.6.2(AASHTO) - Las cargas se colocarán en carriles de diseño de 12 pies de ancho, distribuidos a lo ancho de toda la calzada del puente, medida entre bordillos.

3.6.2 These loads shall be placed in 12-foot wide design

$$12 \text{ ft} = 0.3048 \text{ metros}$$

$$Ancho_{carril} := 12 \cdot 0.3048 \text{ m} = 3.66 \text{ m}$$

$$\frac{A}{Ancho_{carril}} = 2.19$$

$$\text{Numero de carriles} = 2$$

Diseño Viga

1. Predimensionamiento

La losa se la considera como parte integrada de la viga para conformar la sección T

$$h := \left(0.15 \text{ m} + \frac{L}{18} \right) \cdot 1.10 = 1.69 \text{ m}$$

$$h_2 := 0.070 \cdot L = 1.75 \text{ m}$$

$$h_{adoptado} := 1.75 \text{ m}$$

$$t = 0.2 \text{ m}$$

$$bw := 0.4 \text{ m}$$

Ilustración 15 Prediseño Viga T AASHTO Standard

Ancho Colaborante (B)

Viga Interior

$$\frac{L}{4} = 6.25 \text{ m}$$

$$B_{vInt} \leq \blacksquare \quad S = 3 \text{ m}$$

$$12 \cdot t + bw = 2.8 \text{ m}$$

Viga con Volado

$$\frac{L}{12} = 2.08 \text{ m}$$

$$B_{vVOL} \leq \blacksquare \quad 6 \cdot t = 1.2 \text{ m}$$

$$\frac{S - bw}{2} = 1.3 \text{ m}$$

8.10.1.2 For girders having a slab on one side only, the effective overhanging flange width shall not exceed $\frac{1}{6}$ of the span length of the girder, six times the thickness of the slab, or one-half the clear distance to the next web.

Escojo el menor

$$B_{int} := 2.75 \text{ m}$$

Escojo el menor

$$b2 := 1.2 \text{ m} + bw = 1.6 \text{ m}$$

$$B_{ext} := 2 \cdot bw + (1.2 \text{ m}) = 2 \text{ m}$$

$$Viga_Interior := B_{int} = 2.75 \text{ m}$$

$$Viga_volado := B_{ext} = 2 \text{ m}$$

2. Cargas

$$\text{Postes y Pasamano} \quad P_{yp} := 0.2519 \frac{\text{tonne}}{\text{m}} \cdot 2 = 0.5038 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

$$\text{Aceras} \quad A_c := 0.46 \frac{\text{tonne}}{\text{m}} \cdot 2 = 0.92 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

$$\text{Capa de Rodadura} \quad CR := 0.05 \text{ m} \cdot 6.5 \text{ m} \cdot 2.2 \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} = 0.715 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

$$W := P_{yp} + A_c + CR = 2.1388 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

$$W_{x_viga} := \frac{W}{Nb} = 0.71 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Tablero : Viga Interior = Viga Exterior

$$w_{Tablero} := B_{int} \cdot t \cdot 2.4 \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} = 1.32 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Alma

$$w_{alma} := (h_{adoptado} - t) \cdot bw \cdot 2.4 \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} = 1.488 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

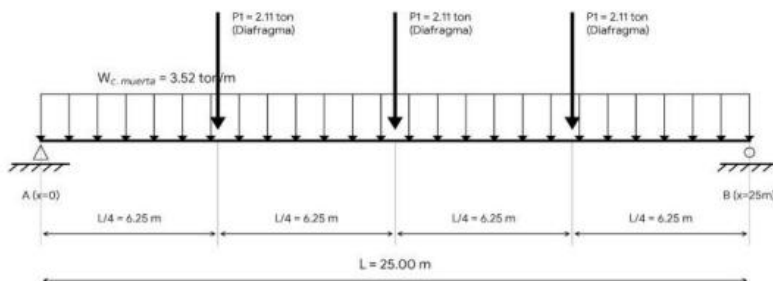
$$W_{c.muerta} := W_{x_viga} + w_{Tablero} + w_{alma} = 3.52 \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$$

Ilustración 16 Ancho Cooperante y Análisis de Cargas

3. Cargas Puntuales de Diafragmas

$$P1 := 0.25 \text{ m} \cdot (S - bw) \cdot (h_{\text{adoptado}} - t - 0.2 \text{ m}) \cdot 2.4 \frac{\text{tonne}}{\text{m}^3} = 2.11 \text{ tonne}$$

8.12.2 In T-girder construction, one intermediate diaphragm is recommended at the point of maximum positive moment for spans in excess of 40 feet. $d_{\text{max}} := 40 \cdot 0.3048 \text{ m} = 12.19 \text{ m}$



$$R_1 := \frac{3 \cdot P1}{2} = 3.159 \text{ tonne}$$

$$R_2 := R_1 = 3.159 \text{ tonne}$$

$$M_{\text{diafr}} := 0.75 \cdot P1 \cdot L - 0.25 \cdot P1 \cdot L = 26.325 \text{ tonne m}$$

$$M_{\text{dist}} := \frac{W_{c.muerta} \cdot L^2}{8} = 275.0729 \text{ tonne m}$$

$$M_{DC} := M_{\text{diafr}} + M_{\text{dist}} = 301.3979 \text{ tonne m}$$

4.-Momento por Carga Muerta

Punto	X(m)	M*w	Mp	Mx(P/2)	Mcm int	Mcm Ext
1	0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	42.240	3.17	1.58	45.41	43.82
3	3	116.160	9.50	4.75	125.66	120.91
4	5	176.000	15.83	7.91	191.83	183.91
5	7	221.760	20.57	10.29	242.33	232.05
6	9	253.440	22.68	11.34	276.12	264.78
7	10	264.000	23.74	11.87	287.74	275.87
8	12.5	275.000	26.38	13.19	301.38	288.19
9	11.5	273.240	25.32	12.66	298.56	285.90

Ilustración 17 Momentos por Carga Muerta AASHTO Standard

5. Factores de Distribución

Carga viva

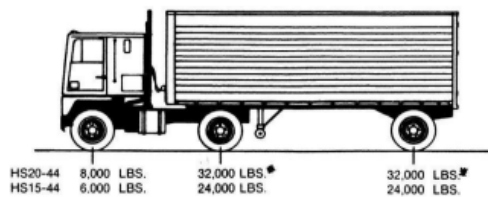
$$\begin{aligned}
 L1 &:= S = 3 \text{ m} & \text{Concrete} & 6 \cdot 0.3048 \text{ m} = 1.8288 \text{ m} \\
 LV &:= 1 \text{ m} & FD &:= \frac{S}{2 \cdot 1.8288 \text{ m}} = 1.6404 \\
 3 \text{ RE} &= 2.4 \text{ P} + 0.57 \text{ P} \\
 RE &:= 0.99 & FD_2 &= 1.6404 \\
 FD_1 &:= RE = 0.99 & \text{Viga Interior} & \\
 & & \text{Viga Exterior} &
 \end{aligned}$$

Kind of Floor	Fraction of Wheel Load to Each Floor Beam
Plank ^{a,b}	$\frac{S}{4}$
Nail laminated ^c or glued laminated ^d , 4 inches in thickness, or multiple layer ^d floors more than 3 inches thick	$\frac{S}{4.3}$
Nail laminated ^c or glued laminated ^d , 6 inches or more in thickness	$\frac{S}{3}$
Concrete	$\frac{S}{6}$
Steel grid (less than 4 inches thick)	$\frac{S}{4.3}$
Steel grid (4 inches or more)	$\frac{S}{6}$
Steel bridge corrugated plank (2 inches minimum depth)	$\frac{S}{5.3}$

Note:
^a S = spacing of floor beams in feet.
^b For footnotes a through e, see Table 3.23.1.
^c If S exceeds dimension, the load on the beam shall be the reaction of the wheels loads assuming the flooring between beams to act as a simple beam.

6. Momentos por Carga Viva

Camion HS20-44



Camion (0.5P ; 2P ; 2P)

$$Eje_{delantero} := 3.64 \text{ tonne}$$

$$Eje_{Central} := 14.52 \text{ tonne}$$

$$Eje_{posterior} := 14.52 \text{ tonne}$$

$$D_{ejes} := 14 \cdot 0.3048 \text{ m} = 4.27 \text{ m}$$

$$p := Eje_{delantero} \cdot 2 = 7.28 \text{ tonne}$$

Punto 1 $x := 1 \text{ m}$

$$y1 := \frac{x \cdot (L - x)}{L} = 0.96 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L - x} \cdot (L - x - 4.27 \text{ m}) = 0.7892 \text{ m}$$

$$y3 := \frac{y1}{L - x} \cdot (L - x - 8.54 \text{ m}) = 0.6184 \text{ m}$$

$$Mc_v := y1 \cdot 2 \cdot p + y2 \cdot 2 \cdot p + y3 \cdot 0.5 \cdot p = 30.56 \text{ ton m}$$

Punto 2

$$x := 3 \text{ m}$$

$$y1 := \frac{x \cdot (L - x)}{L} = 2.64 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L - x} \cdot (L - x - 4.27 \text{ m}) = 2.1276 \text{ m}$$

Ilustración 18 Momento Por CV 1 Standard

$$y3 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-8.54 \text{ m}) = 1.6152 \text{ m}$$

$$Mc_v := y1 \cdot 2 \cdot p + y2 \cdot 2 \cdot p + y3 \cdot 0.5 \cdot p = 83 \text{ ton m}$$

Punto 3 $x := 5 \text{ m}$

$$y1 := \frac{x \cdot (L-x)}{L} = 4 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-4.27 \text{ m}) = 3.146 \text{ m}$$

$$y3 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-8.54 \text{ m}) = 2.292 \text{ m}$$

$$Mc_v := y1 \cdot 2 \cdot p + y2 \cdot 2 \cdot p + y3 \cdot 0.5 \cdot p = 112.39 \text{ tonne m}$$

Punto 4 $x := 7 \text{ m}$

$$y1 := \frac{x \cdot (L-x)}{L} = 5.04 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-4.27 \text{ m}) = 3.8444 \text{ m}$$

$$y3 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-8.54 \text{ m}) = 2.6488 \text{ m}$$

$$Mc_v := y1 \cdot 2 \cdot p + y2 \cdot 2 \cdot p + y3 \cdot 0.5 \cdot p = 139 \text{ tonne m}$$

Punto 5 $x := 11.5 \text{ m}$

$$y1 := \frac{x \cdot (L-x)}{L} = 6.21 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-4.27 \text{ m}) = 4.2458 \text{ m}$$

$$y3 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-8.52 \text{ m}) = 2.2908 \text{ m}$$

$$Mc_v := y1 \cdot 2 \cdot p + y2 \cdot 2 \cdot p + y3 \cdot 0.5 \cdot p = 160.57 \text{ tonne m}$$

Punto 6 $x := 12.5 \text{ m}$

$$y1 := \frac{x \cdot (L-x)}{L} = 6.25 \text{ m}$$

$$y2 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-4.27 \text{ m}) = 4.115 \text{ m}$$

$$y3 := \frac{y1}{L-x} \cdot (L-x-8.52 \text{ m}) = 1.99 \text{ m}$$

$$Mc_v := y1 \cdot 2 \cdot p + y2 \cdot 2 \cdot p + y3 \cdot 0.5 \cdot p = 158.16 \text{ tonne m}$$

Ilustración 19 Momentos por CV Standard

7. IMPACTO

$$50 \cdot 0.3048 \text{ m} = 15.24 \text{ m}$$

$$125 \cdot 0.3048 \text{ m} = 38.1 \text{ m}$$

$$I := \frac{15.24 \text{ m}}{L + 38.1 \text{ m}} = 0.2415$$

Max = 30%

$$Im := I = 24.1521 \%$$

3.8.2. Impact Formula

3.8.2.1 The amount of the impact allowance or increment is expressed as a fraction of the live load stress, and shall be determined by the formula:

$$I = \frac{50}{L + 125} \quad (3-1)$$

Momentos Por Viga

$$I' := 1 + I = 1.2415$$

$$M_{CVext_IMP} := \frac{FD_1 \cdot I'}{2} = 0.6146 \text{ xMvia}$$

Exterior

$$M_{CVint_IMP} := \frac{FD_2 \cdot I'}{2} = 1.0183 \text{ xMvia}$$

Interior

Punto	X(m)	y1	y2	y3	Mcv	Mcv+IM int	Mcv+IM ext
1	0	0	0.00	0.0	0	0.00	0.00
2	1	0.96	0.79	0.6	27.72	27.60	17.03
3	3	2.64	2.13	1.6	75.30	74.97	46.27
4	5	4	3.15	2.3	112.39	111.90	69.07
5	7	5.04	3.84	2.6	139.00	138.40	85.42
6	9	5.76	4.22	2.7	155.13	154.46	95.33
7	10	6	4.29	2.6	159.26	158.57	97.87
8	12.5	6.25	4.12	2.0	158.12	157.44	97.17
9	11.5	6.21	4.25	2.3	160.54	159.85	98.66

Tabla 13 Momentos Por Carga Viva + IM AASHTO STANDARD

8. Momentos Últimos

TABLA 3.22.1A Group (N) = $\gamma[\beta_D \cdot D + \beta_L (L + I)]$

$$Mu := 1.3 \cdot (Mcm + 1.67 Mcv_Int)$$

Mu en Ton*m

Punto	X(m)	Mcm int	Mcm Ext	Mcv+IM int	Mcv+IM ext	Mu V.int	Mu V.ext
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	45.41	43.82	27.60	17.03	118.95	93.95
3	3	125.66	120.91	74.97	46.27	326.11	257.64
4	5	191.83	183.91	111.90	69.07	492.31	389.03
5	7	242.33	232.05	138.40	85.42	615.50	487.11
6	9	276.12	264.78	154.46	95.33	694.28	551.18
7	10	287.74	275.87	158.57	97.87	718.31	571.11
8	12.5	301.38	288.19	157.44	97.17	733.59	585.61
9	11.5	298.56	285.90	159.85	98.66	735.16	585.86

Tabla 14 Momentos Últimos AASHTO STANDART 1996

9. Armadura A Flexión

$$F_c = 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$t = 0.2 \text{ m}$$

$$B_{int} = 2.75 \text{ m}$$

$$r := 0.1 \text{ m}$$

$$bw = 0.4 \text{ m}$$

$$h_{adoptado} = 1.75 \text{ m}$$

$$d := h_{adoptado} - r = 1.65 \text{ m}$$

$$Mu_{int} := C - \left(d - \frac{t}{2} \right)$$

Mu ext < Mu Limite----- Viga Rectangular

Mu ext > Mu Limite----- Viga T

$$\phi := 0.9$$

$$Mult := \phi \cdot 0.85 \cdot F_c \cdot B_{int} \cdot t \cdot \left(d - \frac{t}{2} \right) = 1826.055 \text{ tonne m}$$

$$Mextr := 1 \text{ tonne m} < Mult$$

Viga Rectangular

$$\rho_{min} := \frac{14}{4200} = 0.0033$$

$$\rho_{max} := 0.016$$

$$As1 := \rho_{calc} \cdot B \cdot d$$

si $\rho_{calc} < \rho_{min}$

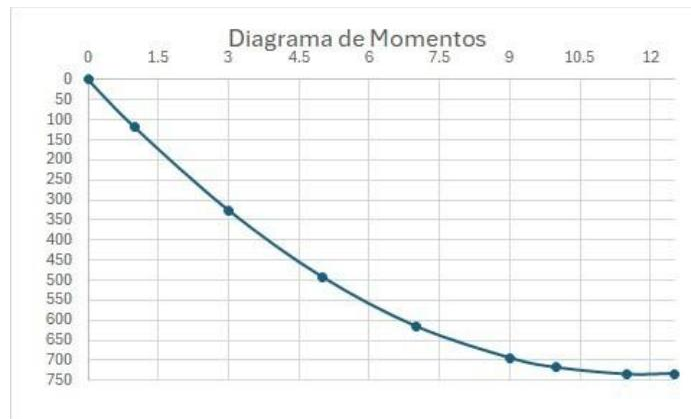
$$Asmin := \rho_{min} \cdot b \cdot d$$

$$db := 3.2 \text{ cm}$$

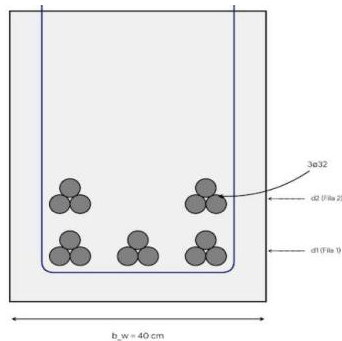
$$Asmin := \rho_{min} \cdot bw \cdot d = 22 \text{ cm}^2$$

Punto	X(m)	Mu	As1	Asmin(cm2)	Armado	As real(cm2)
	0	0				
2	1	118.95	19.14	19.25	3Φ32	24.127
3	3	326.11	52.83	19.25	7Φ32	56.297
4	5	492.31	80.18	19.25	11Φ32	88.467
5	7	615.50	100.66	19.25	13Φ32	104.552
6	9	694.28	113.84	19.25	15Φ32	120.637
7	10	718.31	117.87	19.25	15Φ32	120.637
8	11.5	735.16	120.6	19.25	15Φ32	120.637
9	12.5	733.59	120.44	19.25	15Φ32	120.637

Tabla 15 Armadura a Flexión AASHTO STANDART 1996



10. Espaciamento



S_{min}

$$1.5 \cdot db = 4.8 \text{ cm}$$

$$1.5 \cdot 1 \text{ in} = 3.81 \text{ cm}$$

$$Espacio_{real} := bw - r - 3 \cdot (db + db) = 10.8 \text{ cm}$$

$$S_{ENTRE_varillas} := \frac{Espacio_{real}}{2} = 5.4 \text{ cm}$$

Cumple S entre varillas

Ilustración 20 Diagrama de Momentos AASHTO STANDART 1996

Resumen Python

```

--- RESULTADOS DEL CÁLCULO INTERNO ---
Altura h: 1.75 m (Calculado 0.07*L)
Espesor t: 0.2 m (Calculado 0.10+S/30)
Carga Muerta Wcm: 3.52 Ton/m (Calculado Losa+Alma+CargaAdic)
Diafragma P: 2.11 Ton
Factor Distribución: 1.6404
Impacto: 1.2415
-----

--- TABLA DE DISEÑO FINAL ---
X(m)   Mcm   Mcv+I   Mu    As1   Armado
0.0    0.00   0.00    0.00   0.00   0 Ø 32
1.0    45.41  28.23  120.31  19.36   3 Ø 32
3.0   125.66  76.67  329.81  53.43   7 Ø 32
5.0   191.82 114.44  497.83  81.10  11 Ø 32
7.0   242.33 141.54  622.31 101.79  13 Ø 32
9.0   276.12 157.96  701.89 115.11  15 Ø 32
10.0  287.74 162.17  726.13 119.18  15 Ø 32
11.5  298.56 163.48  743.03 122.03  16 Ø 32
12.5  301.38 161.01  741.34 121.74  16 Ø 32

```

Tabla 16 Resumen Momentos Python AASHTO 1996

CAPÍTULO 4 Análisis Normativo y Económico

4.1 Predimensionamiento De los Elementos

Al realizar la comparativa geométrica entre los dos diseños se evidenció que, aunque la filosofía de cálculo de cargas y resistencias cambió radicalmente entre 1996 y 2024, las dimensiones físicas del puente resultaron ser prácticamente idénticas.

La Altura de la Viga h_{min} : El factor 0.070

Lo que llama la atención es que el criterio de rigidez para controlar deflexiones no ha variado en casi 30 años.

- En el diseño con AASHTO LRFD 2024, se utiliza la Tabla 2.5.2.6.3-1 que recomienda una altura mínima de $0.070L$ para vigas T de hormigón armado.
- En el diseño con AASHTO Standard 1996, la Tabla 8.9.2 prescribe exactamente el mismo coeficiente: 0.070 Luz.

Esto dio como resultado en ambos casos una altura mínima recomendada de 1.75 m

El Espesor de la Losa (t):

Aquí la coincidencia fue numérica.

- La AASHTO Standard exige usar una fórmula dependiente de la separación entre vigas: $t = 0.10 + S/30$, lo que matemáticamente da 0.20 m.
- La AASHTO LRFD simplifica esto exigiendo un espesor mínimo de 17.5 cm (9.7.1.1) más una superficie de desgaste. Al sumar el recubrimiento, se llega a los mismos 0.20 m.

Esta comparación valida que predimensionamiento es el adecuado. El hecho de que dos normativas distintas converjan en una viga de 1.75 m de alto y una losa de 20 cm de espesor confirma que estas dimensiones son las óptimas para un puente de 25 metros, y que las diferencias que encontraré más adelante en el acero de refuerzo se deberán exclusivamente a los factores de carga y resistencia, mas no a la geometría de la sección."

4.2 Modelo de Carga Viva: HS20-44 vs. HL-93

Al definir las cargas vehiculares se encontró una diferencia en las solicitudes. Bajo la AASHTO Standard 1996, el diseño se rige por el camión HS20-44. La norma especifica claramente que debo calcular los efectos del Camión Estándar y, por separado, los de la Carga de Carril (Lane Load), y diseñar la viga únicamente con la que produzca el mayor efecto. En este caso, para 25 metros, gobernó el camión.

Sin embargo, la AASHTO LRFD introduce el modelo HL-93 aquí la filosofía cambia: ya se elige uno o el otro la normativa nos exige la superposición simultánea del Camión de Diseño (o Tándem) más la Carga de Carril de Diseño 0.96 t/m o 0.64 klf

Esto implica que el modelo LRFD es más pesado. Mientras que en la AASHTO 1996 la viga solo soporta los ejes del camión, en el diseño LRFD se soporta esos mismos ejes más una carga distribuida constante en todo el puente. Esto explica por qué los momentos en LRFD suelen ser mayores, reflejando el tráfico moderno donde los camiones circulan rodeados de otros vehículos ligeros, no en solitario.

4.3 Factores de Distribución e Impacto

En el diseño bajo AASHTO Standard 1996, la norma simplifica este fenómeno basándose casi exclusivamente en la geometría. Para las vigas interiores, se utilizó una relación directa de separación ($S/1.828$) y para las exteriores se aplicó la estática simple mediante la regla de la palanca. Este enfoque asume implícitamente que el tablero actúa de forma simplificada, ignorando en gran medida la rigidez de los materiales.

En contraste, la filosofía de la AASHTO LRFD abandona estas fórmulas sencillas por ecuaciones complejas que introducen parámetros de rigidez longitudinal (K_g). Esto demuestra que, mientras el código de 1996 buscaba facilidad de cálculo manual, la normativa actual prioriza la precisión, modelando cómo la rigidez de la viga y la losa trabajan juntas para repartir las cargas.

Otra de las discrepancias conceptuales más notables que se identificó entre ambas normativas radica en cómo tratan la amplificación dinámica de las cargas vehiculares.

En el cálculo bajo la AASHTO Standard 1996, el factor de impacto (I) se concibe como una función dependiente de la longitud del tramo. La lógica detrás de la fórmula empírica $I = 15.24/(L+38.1)$ es que, a mayor luz del puente, las vibraciones tienden a amortiguarse más, reduciendo el efecto de golpe. Al aplicar esto al puente de 25 metros, la norma permitió reducir el impacto a un 24.15%, manteniéndose bajo el tope máximo del 30% por norma.

Por el contrario, al revisar la normativa AASHTO LRFD noté que este enfoque cambia radicalmente ya no se utiliza una fórmula ligada a la longitud sino una tabla fija (Tabla 3.6.2.1-1) que asigna un valor constante del 33% (IM) para el estado límite de resistencia de todos los componentes estáticos.

Al comparar los resultados del diseño de vigas de 25 metros:

- **AASHTO 1996:** Incrementa la carga viva en un 24.15%.
- **AASHTO LRFD:** Incrementa la carga viva en un 33.00%.

Esto implica que la normativa actual (LRFD) es aproximadamente un 9% más conservadora en este aspecto específico para luces medianas, asumiendo siempre el peor escenario de la superficie del pavimento, mientras que la normativa antigua era más permisiva conforme crecía la luz del puente.

Comparativa Momentos Últimos LRFD VS STANDARD

Hemos usado para el método AASHTO Standard hemos usado el Grupo I este es una combinación bajo la metodología ASD Y LFD y representa la condición de operación normal del puente tratando de garantizar que el puente soporte el tráfico sin exceder su capacidad. Por otro lado, en el diseño LRFD usamos el estado límite de desempeño resistencia 1 en el cual el LRFD incluye modificadores de carga basados en confiabilidad estadística que penalizan estructuras no redundantes o con poca ductilidad por estos motivos tenemos que el momento de resistencia 1 será mayor al momento último del grupo 1 de la normativa AASHTO STANDARD

Una vez usando el programa de Python para tener el cálculo de forma clara podemos ver que el acero necesario para cada diseño es diferente esto ya que nuestro momento de Resistencia 1 máximo en el LRFD es de 819.85 Ton*m y el momento máximo del Standard del grupo 1 es 741.35 Ton*m

Comparativa De Diseño: AASHTO LRFD 2024 vs STANDARD 1996						
X(m)	Mu_LRFD	AS_LRFD	ARMADO_LRFD	Mu_STANDARD	As_STD	Armado_STD
1.0	129.24	23.29	3 Ø 32	120.31	19.36	3 Ø 32
3.0	354.72	63.91	8 Ø 32	329.81	53.43	7 Ø 32
5.0	536.22	96.62	13 Ø 32	497.84	81.10	11 Ø 32
7.0	669.71	120.67	16 Ø 32	622.32	101.79	13 Ø 32
9.0	758.20	136.61	17 Ø 32	701.90	115.12	15 Ø 32
11.0	802.85	144.66	18 Ø 32	740.00	121.52	16 Ø 32
11.5	810.51	146.04	19 Ø 32	743.04	122.03	16 Ø 32
11.0	802.85	144.66	18 Ø 32	740.00	121.52	16 Ø 32
11.5	810.51	146.04	19 Ø 32	743.04	122.03	16 Ø 32
11.5	810.51	146.04	19 Ø 32	743.04	122.03	16 Ø 32
11.5	810.51	146.04	19 Ø 32	743.04	122.03	16 Ø 32
12.5	819.85	147.72	19 Ø 32	741.35	121.75	16 Ø 32

Tabla 17 Momentos AASHTO LRFD 2024 VS STANDARD 1996

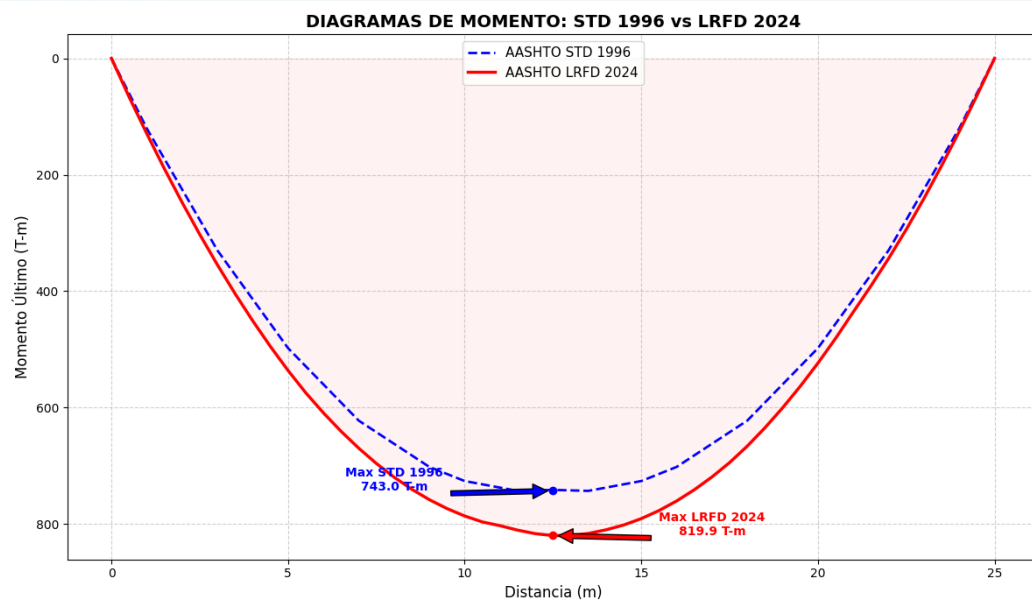


Ilustración 21 Comparativa Diagrama de Momentos AASHTO LRFD 2024 VS STANDARD 1996

Para la elaboración del presupuesto referencial del presente proyecto, se han utilizado los rubros referenciales de la cámara de la industria de la construcción (CAMICON), correspondientes al período Octubre - diciembre 2025.

La elección de esta fuente se fundamenta en su reconocimiento técnico dentro del sector de la construcción en el Ecuador, garantizando que los costos proyectados se ajusten a la realidad del mercado local.

4.5. Metodología de Análisis de Costos (CAMICON)

El análisis de costos unitarios adoptado sigue la metodología estándar de la CAMICON, la cual desglosa el Costo Directo en tres componentes fundamentales:

- **Materiales:** Los precios de los insumos (Hormigón y Acero.) han sido calculados específicamente para la ciudad de Quito. Estos valores reflejan condiciones de mercado actuales y disponibilidad local.
- **Mano de Obra:** Para el cálculo del componente laboral, la CAMICON utiliza los salarios y beneficios sociales estipulados por el Ministerio del Trabajo vigentes a la fecha. Esto asegura el cumplimiento de las obligaciones legales y prestaciones sociales del personal obrero.
- **Equipos y Herramientas:** Se consideran tarifas de alquiler y costos de operación de maquinaria estándar en el medio.

4.6 Rendimientos y Productividad

Un factor crítico en la determinación del precio unitario es el rendimiento de la mano de obra (tiempo necesario para ejecutar una unidad de obra). Para este presupuesto, se han adoptado los

rendimientos resultantes de los estudios de productividad que reposan en los archivos técnicos de la CAMICON.

Estos rendimientos son conservadores y representan un promedio estadístico de obras realizadas en la región, lo que permite mitigar riesgos de sobrecostos por ineficiencias no previstas durante la ejecución del puente.

Geometría Viga T		
Altura total (h):	1.75	m
Espesor de la Losa (t):	0.20	m
Ancho del Alma (bw):	0.40	m
Altura del Alma (h_alma):	1.55	m
Longitud (L):	25.00	m

Normativa	Refuerzo	Cantidad de Acero (kg)
AASHTO LRFD 2024	19 ϕ 32	2997.25
AASHTO STANDART 1996	16 ϕ 32	2524.00

Tabla 18 Detalles Viga

AASHTO LRFD 2024							
A	COSTO DE MATERIALES	Unidad	Precio Unitario (\$)	A Utilizar	Desperdicio %	Total (\$)	
1	HORMIGON ARMADO Fc 280 kg/cm2	M3	91.28	29.25	0.05	2803.44	
2	ACERO Fy 4200 kg/cm2	Kg	1.28	2997.25	0.05	4028.30	
TOTAL MATERIALES						6831.74	
B	MANO DE OBRA	Cantidad	Pago (\$/hr)	Costo/hr	Rend.	Costo (\$)	Total (\$)
1	Maestro de Obra (C2)	0.2	4.52	0.465	0.04	0.036	108.38
2	Fierrero (D2)	1	4.28	4.28	0.04	0.17	513.13
3	Peón (E2)	4	4.23	8.46	0.04	0.68	2028.54
TOTAL MANO DE OBRA						0.88	2650.05
C	COSTO DE EQUIPOS	Unidad	Cantidad	Costo/hr	Rend.	Costo (\$)	Total (\$)
1	Encofrado	m2	1	-	-	250	250
2	Vibrador Hormigón	m3	29.25	1.85	0.04	2.2	64.35
3	Herramienta Menor		1	-	0.05	5% MO	132.50
TOTAL COSTO EQUIPOS							446.85

Tabla 19 Análisis de precios Unitarios AASHTO 1996

AASHTO Standard 1996							
A	COSTO DE MATERIALES	Unidad	Precio Unitario (\$)	A Utilizar	Desperdicio %	Total (\$)	
1	HORMIGON ARMADO Fc 280 kg/cm2	M3	91.28	29.25	0.05	2803.44	
2	ACERO Fy 4200 kg/cm2	Kg	1.28	2524.00	0.05	3392.26	
TOTAL MATERIALES						6195.69	
B	MANO DE OBRA	Cantidad	Pago (\$/hr)	Costo/hr	Rend.	Costo (\$)	Total (\$)
1	Maestro de Obra (C2)	0.2	4.52	0.465	0.04	0.036	91.27
2	Fierrero (D2)	1	4.28	4.28	0.04	0.17	432.11
3	Peón (E2)	4	4.23	8.46	0.04	0.68	1708.24
TOTAL MANO DE OBRA						0.88	2231.62
C	COSTO DE EQUIPOS	Unidad	Cantidad	Costo/hr	Rend.	Costo (\$)	Total (\$)
1	Encofrado	m2	1	-	-	250	250
2	Vibrador Hormigón	m3	29.25	1.85	0.04	2.2	64.35
3	Herramienta Menor		1	-	0.05	5% MO	111.58
TOTAL COSTO EQUIPOS							425.93

Tabla 20 Análisis de Precios Unitarios LRFD

Normativa	Materiales (\$)	Mano De Obra (\$)	Equipos (\$)	Total (\$)
AASHTO LRFD 2024	6831.74	2650.05	446.85	9928.64
AASHTO STANDART 1996	6195.69	2231.62	425.93	8853.24

Tabla 21 Resumen Costos STANDART Y LRFD

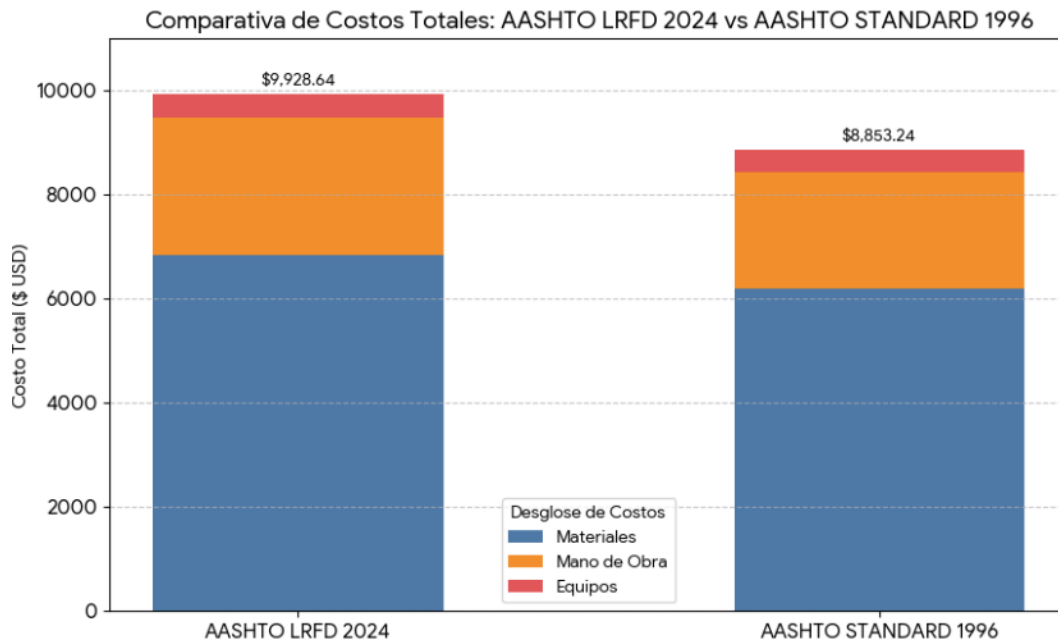


Ilustración 22 Comparativa Económica

Podemos apreciar que el incremento en la normativa AASHTO LRFD es del 10.83% y es debido al acero ya que sus dimensiones son las mismas pero la normativa LRFD al tomar mayores cargas como la de carga de tándem o Camión más la carga viva vehicular nos obliga a tener un mayor porcentaje de acero en esta

CAPÍTULO 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Al finalizar la comparativa entre ambas normativas, se pudo evidenciar que, si bien el punto de partida fue el mismo para ambos casos manteniendo una sección de viga idéntica de 1.75 m de peralte por 0.50 m de ancho, los resultados de diseño final presentan diferencias sustanciales debido a la filosofía de seguridad de cada código. La principal diferencia observada radica en las solicitaciones de Carga Viva. Se comprobó que la normativa AASHTO LRFD es considerablemente más conservadora que la Standard (LFD). Esto se debe a que el modelo de carga HL-93 (LRFD) exige la combinación simultánea del camión de diseño más la carga de carril en todo momento, lo que eleva significativamente los momentos flectores y cortantes de diseño. En contraste la normativa Standard suele evaluar estas cargas de forma separada o con combinaciones menos agresivas para luces medias como la de este proyecto $L=25$ m.
- Además, la metodología de cálculo varió notablemente en los factores de corrección. Mientras que en la normativa Standard el factor de impacto depende de la longitud del puente teniendo valores cercanos al 24-26%, en la LRFD este es un valor fijo del 33% para los estados límites lo que castiga más la estructura. De igual forma, los factores de distribución de carga dejaron de ser fórmulas como el $S/1.829$ de la Standard para convertirse en ecuaciones que consideran la rigidez del tablero en la LRFD.
- En los Diseños se obtuvieron aumentos en el Momento Último de Diseño M_u pasando de 743.59 Ton*m bajo la norma Standard 1996 a 819.65 Ton*m bajo LRFD 2024 este incremento que representa aproximadamente un 20.2% adicional de demanda se atribuye principalmente a la adopción del camión de diseño HL-93 que combina la carga del camión con la carga de carril simultáneamente y a los factores de carga más rigurosos del estado

límite de Resistencia I $g_{LL}=1.75$. Como respuesta directa al incremento del momento, el área de acero requerida aumentó en 24.1 cm². Esto confirma que los puentes diseñados bajo códigos anteriores estarían bajo lo mínimo requerido por la normativa actual AASHTO LRFD 2024.

- En cuanto al aspecto económico, es innegable que el método LRFD conlleva un costo inicial más elevado, repercutiendo directamente en el presupuesto debido al aumento necesario en la cuantía de acero de refuerzo. Sin embargo, este sobre costo se justifica plenamente al analizar el ciclo de vida del puente. Al basarse en la confiabilidad estadística y en una calibración rigurosa de cargas y materiales, el LRFD garantiza una mayor vida útil y una seguridad estructural superior. Por lo tanto, esa inversión extra en acero compensa el riesgo, asegurando una infraestructura más robusta ante las cargas de tráfico modernas y reduciendo la probabilidad de fallas o mantenimientos mayores a largo plazo.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda tener especial precaución al interpretar los factores de combinación de carga del método LFD (Load Factor Design) de la AASHTO Standard, específicamente en la aplicación del coeficiente $\beta = 1.67$ para carga viva. Durante el desarrollo de este análisis, se evidenció que es fácil confundir la filosofía de este método con el diseño por tensiones admisibles (ASD) o asumir factores modernos, lo que puede llevar a subestimar los momentos últimos de diseño.
- Es fundamental considerar que los rendimientos y costos de mano de obra utilizados en este análisis corresponden a las condiciones de la ciudad de Quito, tal como lo establece la metodología de la CAMICON. Para la aplicación de este presupuesto en otras regiones del país, se recomienda aplicar los factores de corrección geográfica pertinentes, ajustando principalmente los costos de transporte de materiales y las tarifas de mano de obra locales para evitar desviaciones en el presupuesto de obra.
- Al realizar comparaciones económicas entre normativas se sugiere centrar el análisis en la incidencia del Acero de Refuerzo sobre el costo total. Como se evidenció en los precios unitarios (octubre-diciembre 2025), el acero es el rubro de mayor peso presupuestario. Dado que la norma LRFD 2024 tiende a ser más exigente en las solicitudes por carga viva vehicular, cualquier optimización económica debe buscarse en la eficiencia de la sección transversal (hormigón) y no en la reducción de armadura, para no comprometer los índices de confiabilidad exigidos por la normativa vigente.

Referencias:

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1996). *Standard Specifications for Highway Bridges* (16th ed.). Washington, D.C.: Author. American

Association of State Highway and Transportation Officials. (2024). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (10th ed.). Washington, D.C.: Author.

Cámara de la Industria de la Construcción. (2025, 13 de octubre). *Rubros referenciales octubre – diciembre 2025*. <https://camicon.ec/web/download/rubros-referenciales-octubre-diciembre-2025/>

Contraloría General del Estado. (s.f.). *Salarios Mano de Obra*. Recuperado el 12 de enero de 2026, de <https://www.contraloria.gob.ec/Informativo/SalariosManoObra>

Barker, R. M., & Puckett, J. A. (2013). *Design of highway bridges: An LRFD approach* (3.^a ed.). John Wiley & Sons.

Valenzuela Carrasco, R. A. (2019). *Análisis de costos y eficiencia técnica de vigas para superestructuras de puentes de diferentes luces en hormigón presforzado y hormigón armado* [Trabajo de titulación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Institucional PUCE. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/26337>

Ochoa Espinoza, C. A. (2008). *Diseño de superestructuras de puentes de hormigón armado: Comparación entre diseño según norma AASHTO Standard (método ASD) y norma AASHTO LRFD* [Tesis de título, Universidad Austral de Chile]. Scribd. <https://es.scribd.com/document/230443120/Comparacion-Entre-Diseno-de-Puentes-Segun-Norma-AASHTO-Standard-Metodo-ASD-y-Norma-AASHTO-LRFD>

Federal Highway Administration [FHWA]. (2020). *LRFD Steel Girder Superstructure Design Example* [Informe técnico]. U.S. Department of Transportation. https://www.fhwa.dot.gov/bridge/lrfd/us_ds3.cfm

McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2002). *Design of Reinforced Concrete* (8th ed.). Wiley

Ivashov, A. (2024). *SMath Studio* (Versión 1.0.8348) [Software de computación]. <https://smath.com>

Python Software Foundation. (2025). *Python* (Versión 3.14.2) [Software de computación]. <https://www.python.org/>

Anexos:

AASHTO STANDART 1996 PYTHON:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches
import numpy as np
import pandas as pd
import math

def reporte_diseno_puente():
    print("DISEÑO DE VIGAS AASHTO STANDARD 1996 - PYTHON ")

    # 1. DATOS DE ENTRADA
    Largo = 25.0 # m (Longitud del puente) puedo modificar para ver en diferentes longitudes
    S = 3.0 # m (Separación entre vigas)
    bw = 0.40 # m (Ancho del alma)
    num_vigas = 3 # Cantidad de vigas
    Ancho_calzada = 6.5 # m 8metros menos 0.75m de rroteccion a cada lado 6.5m

    # Materiales
    fc = 280.0 # kg/cm2
    fy = 4200.0 # kg/cm2
    Concreto_Densidad = 2.4 # Ton/m3
    Asfalto_Densidad = 2.2 # Ton/m3

    # Cargas Muertas Adicionales
    Espesor_asfalto = 0.05 # m
    Peso_barandas_total = 0.5038 + 0.92 # Ton/m (Postes + Aceras)

    # 2. PREDIMENSIONAMIENTO

    # a) Altura de la Viga (h) - AASHTO Tabla 8.9.2 (0.070 * L)
    h_min = 0.070 * Largo
    h_viga = round(h_min, 2) #Redondeo a 2 decimals (1.75m)

    # b) Espesor de Losa (t) - AASHTO (S+3000)/3000 aprox o 0.10 + S/30
    # 0.10 + S/30
    t_min = 0.10 + (S / 30)
    t = round(t_min, 2) # 0.20m

    # c) Ancho Efectivo (Beff) - AASHTO 8.10.1 (Menor de 3 valores)
    # 1. L/4
    # 2. 12*t + bw
    # 3. S (Separación)
    b1 = Largo / 4
    b2 = 12 * t + bw
    b3 = S
    # El código toma el menor teórico
    beff_teorico = min(b1, b2, b3)
    beff = 2.75

    # d) Peralte Efectivo (d)
    recub_centroide = 0.10 # m
    d = h_viga - recub_centroide

    # 3. ANÁLISIS DE CARGAS
    # a) Carga Muerta Distribuida (Wcm)
    w_losa = beff * t * Concreto_Densidad # Peso Losa
    w_alma = (h_viga - t) * bw * Concreto_Densidad # Peso Alma
    # Peso impuesto (Asfalto + Barandas) repartido entre N# vigas
    peso_asfalto = Espesor_asfalto * Ancho_calzada * Asfalto_Densidad
    w_superimp = (peso_asfalto + Peso_barandas_total) / num_vigas
    W_cm = w_losa + w_alma + w_superimp
    W_cm = round(W_cm, 2) # Ton/m

    # b) Carga Diafragma (P)
    # Volumen estimado del diafragma * Densidad
    h_diaf = h_viga - t - 0.20
    P_diaf_calc = 0.25 * (S - bw) * h_diaf * Concreto_Densidad
    P_diaf = round(P_diaf_calc, 2) # 2.11 Ton
```

Ilustración 23 Código Python AASHTO Standard

```

# c) Factores AASHTO
FD_int = round(S / 1.8288, 4) # S/1.8288 para vigas T
I_coef = 15.24 / (Largo + 38.1)
IM = round(1 + I_coef, 4)
Factor_CV = (FD_int * IM) / 2
# resumen de lo calculado para verificar
print("\n- RESULTADOS")
print(f"Altura h: {h_viga} m (Calculado 0.07*L)")
print(f"Espesor t: {t} m (Calculado 0.10+S/30)")
print(f"Carga Muerta Wcm: {W_cm} Ton/m (Calculado Losa+Alma+CargaAdic)")
print(f"Diafragma P: {P_diaf} Ton")
print(f"Factor Distribución: {FD_int}")
print(f"Impacto: {IM}")
print("-" * 40)

# 4. CÁLCULO DE MOMENTOS
p_camion = 7.28 #HS20-44 CAMION DEL CODIGO STANDART
puntos_x = np.arange(0, Largo / 2, 1.0)
puntos_x = np.append(puntos_x, Largo / 2)
#analizo los puntos hasya la mitad dell la vgia
res_total = []
for x in puntos_x:

    # Carga Muerta
    Mw = (W_cm * Largo / 2 * x) - (W_cm * x**2 / 2)
    Ra_diaf = 1.5 * P_diaf
    Mp = Ra_diaf * x

    # Defin ubicacion del diafrg (a 1/3 y 2/3 del largo) normalmente
    dist_diaf = Largo / 3
    if x > dist_diaf: Mp -= P_diaf * (x - dist_diaf)
    if x > (dist_diaf * 2): Mp -= P_diaf * (x - (dist_diaf * 2))
    Mcm = Mw + Mp

    # Carga Viva
    y1 = x * (Largo - x) / Largo
    dist_max = max(x, Largo-x)
    y2 = y1 * (dist_max - 4.27)/dist_max if dist_max > 4.27 else 0
    y3 = y1 * (dist_max - 8.54)/dist_max if dist_max > 8.54 else 0
    Mcv = (y1 * 2 * p_camion) + (y2 * 2 * p_camion) + (y3 * 0.5 * p_camion)
    Mcv_IM = Mcv * Factor_CV

    # Momento Último
    Mu = 1.3 * (Mcm + 1.67 * Mcv_IM)

    # Acero
    if Mu > 0:
        Mu_kgcm = Mu * 100000
        b_cm = beff * 100
        d_cm = d * 100
        A_eq = (0.9 * fy**2) / (1.7 * fc * b_cm)
        B_eq = -0.9 * fy * d_cm
        C_eq = Mu_kgcm
        try:
            disc = B_eq**2 - 4*A_eq*C_eq
            As_calc = (-B_eq - math.sqrt(disc)) / (2*A_eq)
        except:
            As_calc = 0
    else:
        As_calc = 0

```

```

# Armado
# Área de una varilla #10 (32mm) = 8.19 cm2 (o 8.04 cm2)
area_varilla_32 = 8.04

if As_calc > 0:
    # Dividimos As requerido entre área de varilla y redondeamos hacia arriba
    numero_varillas = math.ceil(As_calc / area_varilla_32)
    # Mínimo constructivo (ej. 2 varillas)
    n = max(2, numero_varillas)
else:
    n = 2 # Mínimo corrido
res_total.append([x, round(Mcm,2), round(Mcv_IM,2), round(Mu,2), round(As_calc,2), f"{n} Ø 32"])

df_calculo = pd.DataFrame(res_total, columns=["X(m)", "Mcm", "Mcv+I", "Mu", "As1", "Armado"])
print("\n--- TABLA DE DISEÑO FINAL ---")
print(df_calculo.to_string(index=False))

# 5. fgraficos
#datos para el diagrama de momentos completo (0 a 25m)
X_calc = df_calculo["X(m)"].tolist()
Mu_calc = df_calculo["Mu"].tolist()
# Espejo para el gráfico
X_full = X_calc + [Largo - x for x in X_calc[::-1][::-1]]
Mu_full = Mu_calc + Mu_calc[::-1][::-1]
# Configuración de la Figura
fig = plt.figure(figsize=(16, 12))
plt.subplots_adjust(hspace=0.4, wspace=0.3)

# GRÁFICO 1: Seccion Longitudinal1
ax1 = plt.subplot(3, 2, (1, 2)) # Ocupa todo el ancho superior
ax1.set_title("1. Seccion Longitudinal del Puente", fontsize=11, fontweight='bold')

# Viga
ax1.add_patch(patches.Rectangle((0, 0), Largo, h_viga, fc='e0e0e0', ec='black', lw=1.5))
# Apoyos (Triangulos/Lineas)
ax1.plot([0, -0.5, 0.5, 0], [0, -0.5, -0.5, 0], 'k', lw=2) # Apoyo Izq
ax1.plot([Largo, Largo-0.5, Largo+0.5, Largo], [0, -0.5, -0.5, 0], 'k', lw=2) # Apoyo Der
ax1.axhline(-0.5, color='black', lw=1) # Suelo

# Cotas
ax1.annotate('', xy=(0, -0.8), xytext=(Largo, -0.8), arrowprops=dict(arrowstyle='<->'))
ax1.text(Largo/2, -1.2, f'L = {Largo} m', ha='center', fontweight='bold')
ax1.text(-1, h_viga/2, f'h={h_viga}m', va='center', rotation=90)

ax1.set_xlim(-2, Largo+2)
ax1.set_ylim(-1.5, h_viga+0.5)
ax1.axis('off')

# GRÁFICO 2: Seccion Transversal
ax2 = plt.subplot(3, 2, 3)
ax2.set_title("2. Seccion Tranversal", fontsize=10, fontweight='bold')

Ancho_Total = 8.0 # para dibujo
# Dibujo Losa Superior
ax2.add_patch(patches.Rectangle((-Ancho_Total/2, h_viga-t), Ancho_Total, t, fc='cccccc', ec='black'))

# Dibujo las 3 Vigas (Almas) espaciadas S
# Posiciones: -S, 0, +S
for pos_x in [-S, 0, S]:
    # El alma baja desde la losa (y = h-t) hasta 0
    ax2.add_patch(patches.Rectangle((pos_x - bw/2, 0), bw, h_viga-t, fc='cccccc', ec='black'))
    # Eje de viga
    ax2.plot([pos_x, pos_x], [0, h_viga], 'k-.', lw=0.5, alpha=0.5)

```

```

# Cotas
ax2.annotate('', xy=(-Ancho_Total/2, h_viga+0.5), xytext=(Ancho_Total/2, h_viga+0.5), arrowprops=dict(arrowstyle='<->'))
ax2.text(0, h_viga+0.7, f'Ancho = {Ancho_Total} m', ha='center')
ax2.annotate('', xy=(0, h_viga/2), xytext=(5, h_viga/2), arrowprops=dict(arrowstyle='<->'))
ax2.text(5/2, h_viga/2+0.2, f'S={5}m', ha='center')

ax2.set_xlim(-Ancho_Total/2 - 1, Ancho_Total/2 + 1)
ax2.set_ylim(-0.5, h_viga+1.5)
ax2.axis('off')

# GRÁFICO 3: VIGA T
ax3 = plt.subplot(3, 2, 4)
ax3.set_title("3.VIGA T", fontsize=10, fontweight='bold')

# Definir puntos del polígono T
pts_T = [
    (-beff/2, h_viga), (beff/2, h_viga), # Parte superior
    (beff/2, h_viga-t), (bw/2, h_viga-t), # Ala derecha
    (bw/2, 0), (-bw/2, 0), # Fondo (Alma)
    (-bw/2, h_viga-t), (-beff/2, h_viga-t) # Ala izquierda
]
ax3.add_patch(patches.Polygon(pts_T, closed=True, fc='#e6e6e6', ec='black'))

# Cotas
ax3.text(0, h_viga+0.1, f"Beff = {beff} m", ha='center', fontweight='bold')
ax3.text(bw/2+0.1, h_viga/2, f"h = {h_viga} m", va='center')
ax3.text(0, -0.2, f"bw = {bw} m", ha='center')
ax3.annotate(f"t={t}m", xy=(-beff/2, h_viga-t/2), xytext=(-beff/2-0.8, h_viga-t/2), arrowprops=dict(arrowstyle='->'))

ax3.set_xlim(-beff/2 - 1, beff/2 + 1)
ax3.set_ylim(-0.5, h_viga + 0.5)
ax3.axis('off')

# GRÁFICO 4: Detalle armado (16 varillas) modifíco dependiendo del resultado es mas complejo cambiarle así que manualmente le modifíco
ax4 = plt.subplot(3, 2, 5)
ax4.set_title("4. ARMADO (16  $\phi$  32)", fontsize=10, fontweight='bold')

# Dibujar fondo de la viga
ax4.add_patch(patches.Rectangle((0, 0), bw*100, 60, fc='#f9f9f9', ec='black', lw=2))

# Estribo
rec = 5 # cm
ax4.add_patch(patches.FancyBboxPatch((rec, rec), (bw*100)-2*rec, 60-rec, boxstyle="round,pad=0,rounding_size=2", ec='blue', fc='none', lw=2))

# Función para dibujar un paquete de 3 varillas y 1 mas en la que de porque haasta 4 varillas deja por ormativa
def draw_pack(ax, x, y):
    r = 1.6 # Radio aproximado para dibujo (cm)
    ax.add_patch(patches.Circle((x-r, y), r, fc='#444', ec='k'))
    ax.add_patch(patches.Circle((x+r, y), r, fc='#444', ec='k'))
    ax.add_patch(patches.Circle((x, y+r*1.73), r, fc='#444', ec='k'))
# Coordenadas paquetes
y_base = 5 + 1.2 + 1.6 # Recubrimiento + estribo + radio
x_c = 20 # Centro (bw=40cm)
x_r = 40 - (5 + 1.2 + 3.2) # Derecha
x_l = 5 + 1.2 + 3.2 # Izquierda
# Fila 1 (Abajo): 3 paquetes
draw_pack(ax4, x_l, y_base)
draw_pack(ax4, x_c, y_base)
draw_pack(ax4, x_r, y_base)
# Fila 2 (Arriba): 2 paquetes (intercalados/extremos)
y_up = y_base + 6.0
draw_pack(ax4, x_l, y_up)
draw_pack(ax4, x_r, y_up)
ax4.text(20, -5, f"bw = {bw*100} cm", ha='center')
ax4.set_xlim(-5, 45)
ax4.set_ylim(-10, 50)
ax4.set_aspect('equal')
ax4.axis('off')

```



```

# GRÁFICO 5: Diagrama de momentos
ax5 = plt.subplot(3, 2, 6)
ax5.set_title("5. DIAGRAMA MOMENTO ÚLTIMO (Mu)", fontsize=10, fontweight='bold')
ax5.plot(X_full, Mu_full, color='004c6d', lw=2)
ax5.fill_between(X_full, Mu_full, 0, color='004c6d', alpha=0.1)
ax5.invert_yaxis() # Invertir eje Y (práctica común en momentos)
# Etiqueta del Máximo
max_mu = max(Mu_full)
ax5.text(Largo/2, max_mu+50, f'Mu Max = {max_mu} T-m', ha='center', fontweight='bold', color='004c6d')
ax5.set_xlabel("Distancia (m)")
ax5.set_ylabel("Momento (Ton-m)")
ax5.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.show()
return X_full, Mu_full, Largo
if __name__ == "__main__":
    reporte_diseno_puente()

```

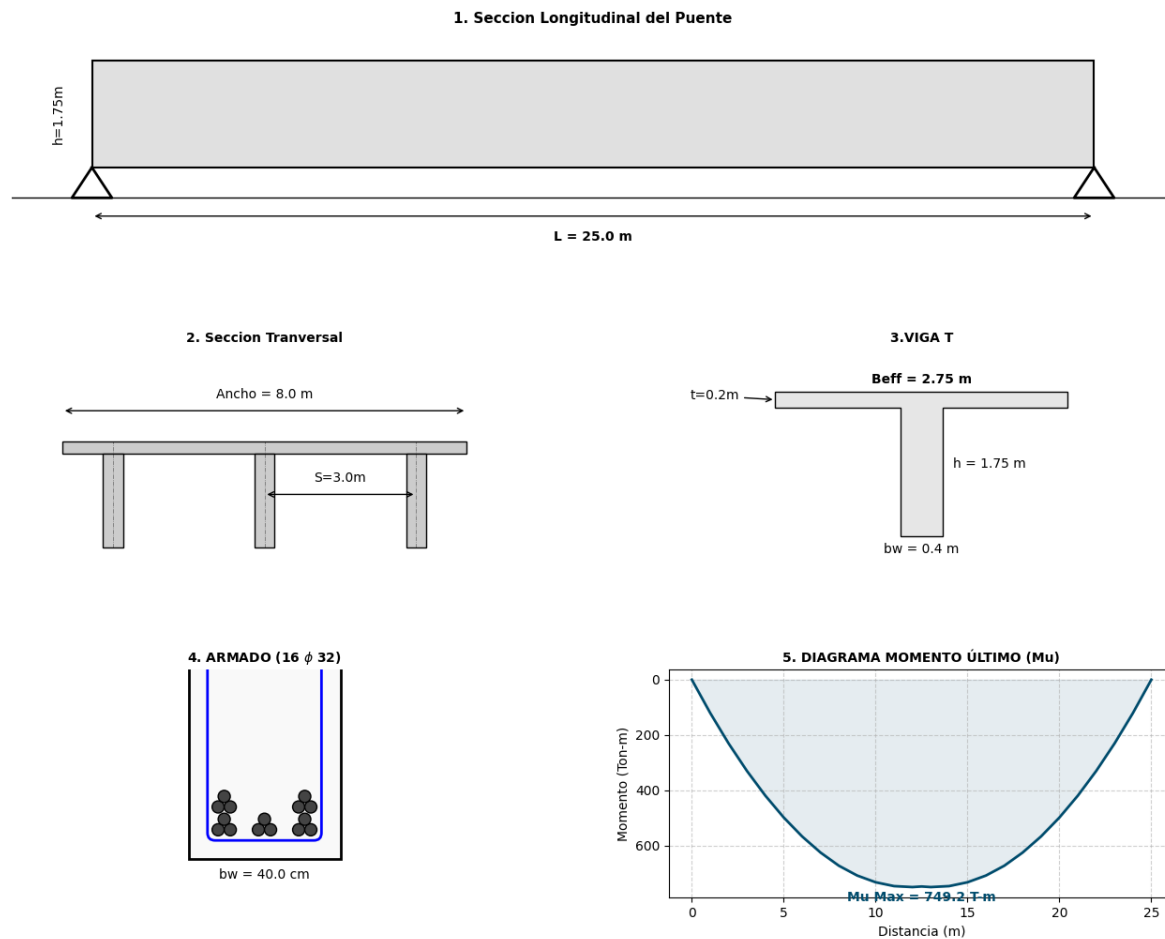


Ilustración 24 Gráficos Python

AASHTO LRFD PYTHON:

```
def analisis_aashto_lrfd_2024():
    import numpy as np
    import pandas as pd
    import matplotlib.pyplot as plt
    import math

    print("AASHTO LRFD 2024 ")
    # --- 1. DATOS DE ENTRADA ---
    L = 25.0
    Ancho = 8.0
    fc = 280.0
    fy = 4200.0
    gamma_conc = 2.4
    gamma_asf = 2.2

    # --- 2. PREDIMENSIONAMIENTO
    h_viga = 0.070 * L
    t_losa = 0.20
    nv = 3
    L_voladizo = 1.0
    S = 3.0
    bw = 0.40

    # --- 3. ANALISIS DE CARGAS ---
    w_losa = S * t_losa * gamma_conc
    w_alma = bw * h_viga * gamma_conc
    w_barrera_total_pdf = 0.9504
    w_barrera = w_barrera_total_pdf / nv
    w_DC = w_losa + w_alma + w_barrera
    h_asf = 0.08
    w_DL = 0.528

    # 4. FACTORES DE DISTRIBUCION
    S_mm = S * 1000
    L_mm = L * 1000
    t_mm = t_losa * 1000
    bw_mm = bw * 1000
    h_viga_mm = h_viga * 1000

    n_modular = 1.0
    h_beam = h_viga_mm - t_mm
    A_beam = bw_mm * h_beam
    I_beam = (bw_mm * h_beam**3) / 12
    eg = (h_beam / 2) + (t_mm / 2)
    Kg = n_modular * (I_beam + A_beam * (eg**2))

    g_1 = 0.06 + (S_mm/4300)**0.4 * (S_mm/L_mm)**0.3 * (Kg / (L_mm * t_mm**3))**0.1
    g_2 = 0.075 + (S_mm/2900)**0.6 * (S_mm/L_mm)**0.2 * (Kg / (L_mm * t_mm**3))**0.1
    g_int = max(g_1, g_2)

    y_DC = 1.25
    y_DL = 1.50
    y_LL = 1.75

    # 5. GENERACION DE MOMENTOS
    x_vals = np.linspace(0, L, 51)
    recub = 0.15
    d = h_viga - recub

    beff = min(L/4, 12*t_losa + bw, S)
    area_varilla = 8.04

    data_resistencia = []

    def linea_influencia_momento(x_sec, x_carga, L_span):
        if x_carga < 0 or x_carga > L_span: return 0.0
        if x_carga <= x_sec:
            return x_carga * (L_span - x_sec) / L_span
        else:
            return x_sec * (L_span - x_carga) / L_span
```

Ilustración 25 Python AASHTO LRFD

```

for x in x_vals:
    M_DC = w_DC * x * (L - x) / 2
    M_DW = w_DW * x * (L - x) / 2
    M_carril = 0.952 * x * (L - x) / 2

    # Camión
    max_M_camion = 0
    P_camion = [3.63, 14.52, 14.52]
    d_ejes = [0, 4.3, 8.6]
    for pos_front in np.linspace(-10, L+10, 100):
        M_temp = 0
        for i in range(3):
            pos_eje = pos_front - d_ejes[i]
            M_temp += P_camion[i] * linea_influencia_momento(x, pos_eje, L)
        if M_temp > max_M_camion:
            max_M_camion = M_temp

    # Tandem
    max_M_tandem = 0
    P_tandem = 11.34
    for pos_front in np.linspace(-5, L+5, 100):
        M_temp = (P_tandem * linea_influencia_momento(x, pos_front, L) +
                  P_tandem * linea_influencia_momento(x, pos_front - 1.2, L))
        if M_temp > max_M_tandem:
            max_M_tandem = M_temp

    IM = 0.33
    M_LL_plus_IM = max(max_M_camion, max_M_tandem) * (1 + IM) + M_carril
    M_LL_final = M_LL_plus_IM * g_int
    Mu = (y_DC * M_DC) + (y_DW * M_DW) + (y_LL * M_LL_final)

    if Mu > 0.1:
        Mu_kgcm = Mu * 100000
        b_cm = beff * 100
        d_cm = d * 100

        # Ecuación cuadrática diseño rotura
        A_eq = (0.9 * fy**2) / (1.7 * fc * b_cm)
        B_eq = -0.9 * fy * d_cm
        C_eq = Mu_kgcm

        try:
            disc = B_eq**2 - 4*A_eq*C_eq
            As_calc = (-B_eq - np.sqrt(disc)) / (2*A_eq)
        except:
            As_calc = 0.0

        num = np.ceil(As_calc / area_varilla)
        n_armado = max(2, int(num))
        txt_armado = f"{n_armado} Ø 32"
    else:
        As_calc = 0.0
        txt_armado = "2 Ø 32"

    data_resistencia.append({
        "x": x,
        "M_DC": M_DC,
        "M_DW": M_DW,
        "M_LL_IM_dist": M_LL_final,
        "Mu_Str1": Mu,
        "As_req": As_calc,
        "Armado": txt_armado
    })

df = pd.DataFrame(data_resistencia)

```

```

# Tabla
print("\nTABLA DE MOMENTOS - AASHTO LRFD 2024 (Resumen)")
print(f'{Dist(m):<8} {M_DC:<8} {M_DW:<8} {M_LL+IM:<10} {MuRES-I:<10} {As(cm2):<10} {Armado:<10}')
print("-" * 75)

indices = np.linspace(0, len(df)-1, 11, dtype=int)
for i in indices:
    row = df.iloc[i]
    print(f'{row["x"]:<8.2f} {row["M_DC"]:<8.2f} {row["M_DW"]:<8.2f} {row["M_LL_IM_dist"]:<10.2f} {row["Mu_Str1"]:<10.2f} {row["As_req"]:<10.2f} {row["Armado"]:<10}')

mu_max_calc = df["Mu_Str1"].max()
print("-" * 75)
print(f"Mu Max Calculado: {mu_max_calc:.2f} T-m")

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(df["x"], df["Mu_Str1"], color="#d62728", lw=3, label='Mu Resistencia I')
plt.fill_between(df["x"], df["Mu_Str1"], 0, color="#d62728", alpha=0.1)
plt.title(f"DIAGRAMA DE MOMENTOS LRFD 2024\n(L={L}m, Viga Interior, HL-93)", fontsize=12, fontweight='bold')
plt.xlabel("Distancia (m)")
plt.ylabel("Momento Flector (T-m)")
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.gca().invert_yaxis()

x_max = df.loc[df["Mu_Str1"].idxmax(), "x"]
plt.annotate(f'Mu Max = {mu_max_calc:.2f} T-m',
            xy=(x_max, mu_max_calc),
            xytext=(x_max, mu_max_calc + 100),
            arrowprops=dict(facecolor='black', shrink=0.05),
            ha='center', fontweight='bold')

plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
return df

```

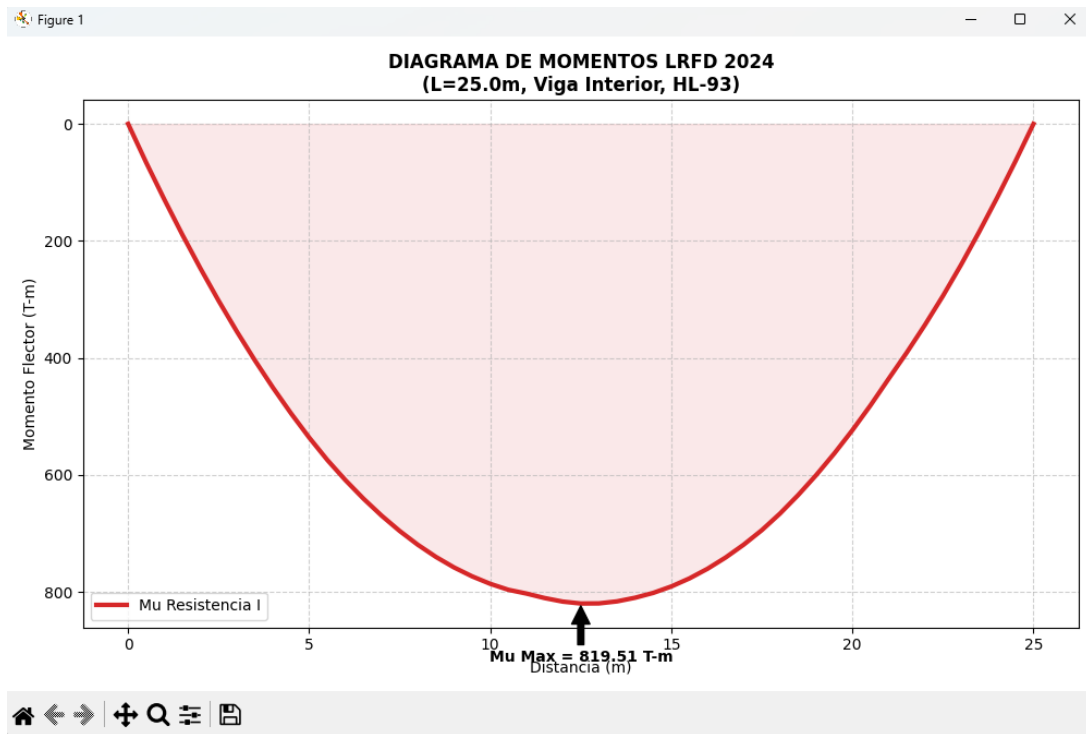


Ilustración 26 Diagrama de Momento AASHTO LRFD

Comparativa LRFD vs STANDARD

```
# 2. Comparativa
# Puntos X exactos que quieres mostrar en la tabla
puntos_tabla = [1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 11.5, 12.5] #puntos que quiero revisar

datos_tabla = []

for x in puntos_tabla:
    # A) DATOS LRFD
    # Buscamos la fila donde x es igual
    fila_l = df_lrfd.iloc[(df_lrfd['x'] - x).abs().argsort()[:1]]
    mu_l = fila_l['Mu_Str1'].values[0]
    as_l = fila_l['As_req'].values[0]
    arm_l = fila_l['Armado'].values[0]

    # B) DATOS STANDARD
    mu_s = np.interp(x, X_std, Mu_std)

    # Recuperar el As Standard
    # (Beff=2.75m, d=1.65m para L=25m)
    d_std = (0.070 * L_puente) - 0.10
    beff_std = 2.75
    Mu_kgcm = mu_s * 100000
    A = (0.9 * 4200**2) / (1.7 * 280 * (beff_std*100))
    B = -0.9 * 4200 * (d_std*100)
    try: as_s = (-B - (B**2 - 4*A*Mu_kgcm)**0.5) / (2*A)
    except: as_s = 0
    n_s = math.ceil(as_s/8.04); n_s = max(3, int(n_s))
    arm_s = f"{n_s} Ø 32"
    datos_tabla.append([x, mu_l, as_l, arm_l, mu_s, as_s, arm_s])

# Crear el DataFrame Final
df_final = pd.DataFrame(datos_tabla, columns=[
    "X(m)", "Mu_LRFD", "AS_LRFD", "ARMADO_LRFD", "Mu_STANDARD", "As_STD", "Armado_STD"
])
# tabla
print("\n\n" + "Comparativa De Diseño: AASHTO LRFD 2024 vs STANDARD 1996".center(100))
print(df_final.to_string(index=False, float_format="%.2f", col_space=10))
print("\n")

# 3. Grafica
plt.figure(figsize=(14, 8))
# Curvas
plt.plot(X_std, Mu_std, label='AASHTO STD 1996', color='blue', lw=2, linestyle='--')
plt.plot(df_lrfd['x'], df_lrfd['Mu_Str1'], label='AASHTO LRFD 2024', color='red', lw=3)
# Rellenos
plt.fill_between(df_lrfd['x'], df_lrfd['Mu_Str1'], 0, color='red', alpha=0.05)
# Etiquetas de Máximos
max_s = max(Mu_std)
max_l = df_lrfd['Mu_Str1'].max()

plt.annotate(f'Max STD 1996\n{max_s:.1f} T-m', xy=(L_puente/2, max_s), xytext=(L_puente/2-4, max_s-60),
            arrowprops=dict(facecolor='blue', shrink=0.05, width=1.5), color='blue', fontweight='bold', ha='center')

x_max_l = df_lrfd.loc[df_lrfd['Mu_Str1'].idxmax(), 'x']
plt.annotate(f'Max LRFD 2024\n{max_l:.1f} T-m', xy=(x_max_l, max_l), xytext=(x_max_l+4, max_l-60),
            arrowprops=dict(facecolor='red', shrink=0.05, width=1.5), color='red', fontweight='bold', ha='center')

plt.title(f"DIAGRAMAS DE MOMENTO: STD 1996 vs LRFD 2024 (L={L_puente}m)", fontsize=14, fontweight='bold')
plt.xlabel("Distancia (m)", fontsize=12)
plt.ylabel("Momento Último (T-m)", fontsize=12)
plt.legend(fontsize=12, loc='upper center')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.gca().invert_yaxis()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Ilustración 27 Python Código Comparativa

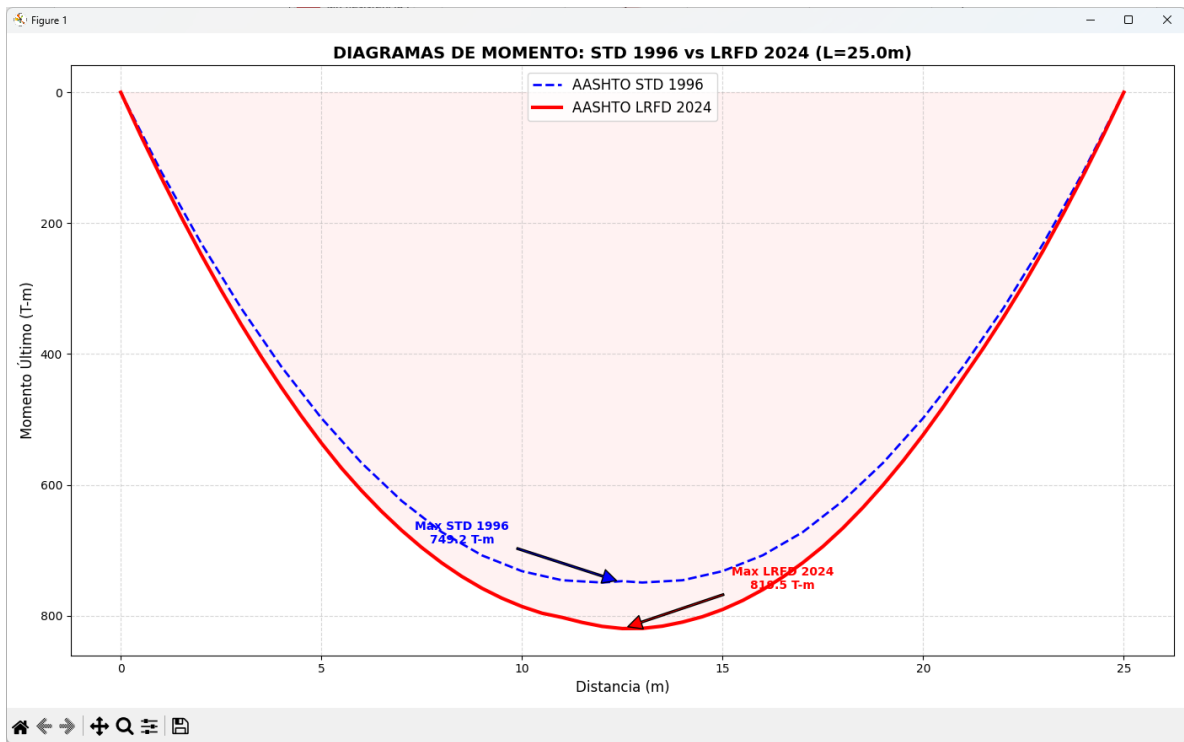


Ilustración 28 Comparativa Diagrama de Momento