



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018

Presentado por:

Amador Villavicencio Villavicencio

Para optar al Título Profesional de
Ingeniero Civil

Asesor:

Dr. Ing. Elvis Yuri Mamani Vargas

CUSCO – PERÚ

2020



Dedicatoria

A Dios

En principio y en toda instancia agradecer a Dios, por cambiar y encontrar el verdadero sentido a mi vida, por su renovación en cuerpo, alma y espíritu.

A mis padres y familiares

Por el apoyo incondicional, moral y económico en todo el trayecto de mi formación académica y profesional. Por tenerme presente siempre es sus corazones y ellos en al mío.

Agradecimientos

A mi asesor y dictaminantes

Ing. Elvis Mamani Vargas por el tiempo invertido en formar parte de este trabajo de investigación, por sus consejos, recomendaciones y enseñanzas a nivel académico y profesional; por ser un excelente guía, instructor y amigo. A mis dictaminantes por su tiempo y sus recomendaciones.

A la Universidad Andina del Cusco

Por ser el centro de grandes anhelos e ideales; por mi formación y consolidación ética, académica, profesional y científica. Por permitir desarrollar mis pensamientos, críticas y reflexiones.



Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método aproximado del ancho equivalente de franjas del manual de puentes MTC 2018.

El desarrollo de la investigación comprende los siguientes procesos: primero, registro de las propiedades de los materiales, propiedades geométricas, cargas de diseño y metrado de cargas; segundo, determinación del ancho equivalente de franjas del manual de puentes MTC 2018 y predimensionamiento del peralte de la losa; tercero, desarrollo del diseño mediante optimización matemática compuesto a su vez por: la discretización de la longitud del puente, determinación de la función objetivo (función matemática principal que será optimizada, en nuestro estudio será el costo directo referencial) y sus subfunciones (peralte de la losa, volumen de concreto, peso del acero y área de encofrado), determinación de la variable (peralte de la losa) a ser optimizada, implementación y programación de los métodos matemáticos (paso constante, bisección y sección aurea) en el software informático Maple, y por último determinación del peralte óptimo de la losa.

Cuarto, una vez determinado el peralte sin optimizar (predimensionado) y optimizado se procedió a la determinación del análisis estructural (fuerzas cortantes y momentos flectores) y diseño estructural (áreas de acero), con estos datos se hallaron los parámetros de la función objetivo (volumen de concreto, peso del acero, área de encofrado y el costo directo referencial), tanto para un diseño optimizado y sin optimizar.

Quinto, del estudio realizado se obtuvo que la función objetivo de un diseño optimizado (por el método de la sección aurea) respecto a uno sin optimizar, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, resultan menores en 15.35% promedio.

Finalmente, como aporte se tiene que el diseño con optimización propuesto es aplicativo en puentes tipo losa de concreto armado para longitudes de entre 4.00 metros y 12.00 metros, teniendo como objetivo principal el de minimizar costos.

Palabras clave:

Optimización matemática, función objetivo, costo directo referencial, diseño optimizado, ancho equivalente de franjas.



Abstract

The objective of this research is to evaluate the difference between an optimized and an unoptimized design in reinforced concrete slab bridges using the approximate equivalent strip width method of the MTC 2018 bridge manual.

The development of the research includes the following processes: first, registration of material properties, geometric properties, design loads and load measurements; second, determination of the equivalent strip width of the MTC 2018 bridge manual and pre-dimensioning of the slab cant; third, design development through mathematical optimization composed of the discretization of the length of the bridge, determination of the objective function (main mathematical function that will be optimized, in our study it will be the referential direct cost) and its subfunctions (slab cant, concrete volume, steel weight and formwork area), determination of the variable (slab cant) to be optimized, implementation and programming of the mathematical methods (constant pitch, bisection and golden section) in the computer software Maple, and finally determination of the optimal slab cant.

Fourth, once the unoptimized (pre-dimensioned) and optimized superelevation was determined, the structural analysis (shear forces and bending moments) and structural design (steel areas) were determined. With these data, the parameters of the objective function (concrete volume, steel weight, formwork area and the referential direct cost) were found, both for an optimized and unoptimized design.

Fifth, from the study carried out, it was obtained that the objective function of an optimized design (by the method of the golden section) with respect to one without optimization, for spans of 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m and 12.00m, are lower by 15.35% on average.

Finally, as a contribution, the design with optimization proposed is applicable in bridges type slab of reinforced concrete for lengths of between 4.00 meters and 12.00 meters, having as main objective to minimize costs.

Keywords:

Mathematical optimization, objective function, referential direct cost, optimized design, equivalent strip width.



Introducción

El departamento de Cusco posee una variada y accidentada geografía, la cual le ha permitido crear elementos de infraestructura civil para salvar dichos obstáculos, es debido a ello la gran aplicabilidad de los puentes. De acuerdo a factores como la topografía, geotecnia, estudio de suelos, hidrología e hidráulica, tráfico, y la longitud a salvar estos se clasifican en varios subtipos, teniendo como caso de estudio los tableros de la superestructura en puentes tipo losa de concreto armado con luces menores a 12.00 metros, según especificaciones del Manual de Puentes del MTC 2018.

El diseño y construcción de este tipo de puentes se ha intensificado en el área de todo el departamento del Cusco. Al parecer el uso masivo y frecuente de este tipo de puentes, se debe a las cortas longitudes a salvar, un análisis y diseño estructural practico ya que se sustenta en formulas y métodos aproximados sencillos de calcular, su facilidad constructiva, materiales y herramientas de construcción comerciales y mano de obra no necesariamente calificada.

Sin embargo, la sencillez del análisis y diseño estructural de este tipo de elementos podría mejorarse mediante una optimización, es por ello la importancia de abordar esta investigación donde la tesis denominada “Estudio comparativo entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del manual de puentes MTC 2018”, permitirá en primer lugar evaluar e implementar, a nivel del análisis y diseño estructural, una metodología de optimización matemática (implementación y programación matemática en el programa Maple) aplicada a puentes tipo losa de concreto armado sin optimizar.

Para finalmente comparar los resultados de los parámetros de la función objetivo (función matemática principal que será optimizada) de un diseño optimizado respecto de otro sin optimizar, tales parámetros a evaluar son el peralte, el volumen del concreto, el peso del acero, el área del encofrado y el costo directo referencial.

Para el análisis y diseño estructural, en puentes tipo losa de concreto armado, se aplicará el método aproximado del Ancho Equivalente de franjas que el Manual de Puentes del MTC 2018 sugiere; así mismo para la optimización matemática se aplicará algoritmos de búsqueda lineal, como el Paso constante, Bisección y Sección Aurea, la inclusión de estos algoritmos se debe a su maniobrabilidad y facilidad de programación.



Índice General

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Abstract.....	iii
Introducción	iv
Índice General.....	v
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	xi
1. Capítulo I: Planteamiento del Problema	1
1.1. Identificación del Problema.....	1
1.1.1. Descripción del Problema.....	1
1.1.2. Formulación del Problema	3
1.2. Justificación e Importancia de la Investigación	4
1.2.1. Justificación Técnica.....	4
1.2.2. Justificación Social	4
1.2.3. Justificación por Viabilidad.....	4
1.2.4. Justificación por Relevancia.....	5
1.3. Limitaciones de la Investigación.....	5
1.3.1. Limitaciones de Estudio	5
1.4. Objetivos de la Investigación.....	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivos Específicos.....	7
2. Capítulo II: Marco Teórico	9
2.1. Antecedentes de la Tesis o Investigación Actual.....	9
2.1.1. Antecedentes a Nivel Nacional.....	9
2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes	14
2.2.1. Definición de Puente.....	14
2.2.2. Clasificación de Puentes.....	17
2.2.3. Puentes Losa	18



2.2.4. Geometría	20
2.3. Análisis Estructural	22
2.3.1. Filosofía de diseño	22
2.3.2. Estados Límites	23
2.3.3. Ductilidad	25
2.3.4. Redundancia	26
2.3.5. Importancia Operativa.....	26
2.3.6. Determinación de Cargas	27
2.3.7. Métodos Aproximados de Análisis	35
2.3.8. Líneas de Influencia	39
2.3.9. Peraltes y Recubrimientos	44
2.4. Diseño Estructural	46
2.4.1. Diseño por Corte	46
2.4.2. Diseño por Flexión.....	49
2.4.3. Diseño del Acero de Refuerzo.....	51
2.4.4. Revisión por Fisuración o Estado Límite de Servicio.....	53
2.4.5. Revisión por Fatiga o Estado Límite de Fatiga	55
2.5. Optimización Matemática.....	58
2.5.1. Conceptos Básicos	58
2.5.2. Clasificación	58
2.5.3. Técnicas de Optimización	59
2.5.4. Optimización Global y Local.....	60
2.5.5. Optimización Unidimensional No Restringida.....	60
2.5.6. Métodos de Optimización Unidimensional Sin Restricciones (OSR)	61
2.5.7. Optimización Estructural Aplicada a Puentes	71
2.5.8. Formulación Matemática de la Función Objetivo	71
2.6. Hipótesis	74
2.6.1. Hipótesis General.....	74
2.6.2. Hipótesis Específicas	74
2.7. Definición de Variables e Indicadores	75
2.7.1. Variables Independientes	75
2.7.2. Variables Dependientes.....	75
2.7.3. Cuadro de Operacionalización de Variables	76



3. Capítulo III: Metodología	78
3.1. Metodología de la Investigación	78
3.1.1. Enfoque de la Investigación	78
3.1.2. Nivel o Alcance de la Investigación	78
3.1.3. Método de Investigación	78
3.2. Diseño de la Investigación	79
3.2.1. Diseño Metodológico	79
3.2.2. Diseño de Ingeniería	79
3.3. Población y Muestra	81
3.3.1. Población	81
3.3.2. Muestra	82
3.3.3. Criterios de Inclusión	82
3.4. Instrumentos	84
3.4.1. Instrumentos de Recolección de Datos	84
3.4.2. Instrumentos de Ingeniería	93
3.5. Procedimientos de Recolección de Datos	94
3.5.1. Discretización	94
3.5.2. Declaración de Variables	95
3.6. Procedimientos de Análisis de Datos	96
3.6.1. Evaluación de Momentos Flectores	96
3.6.2. Evaluación de Fuerzas Cortantes en Estado Límite de Resistencia	104
3.6.3. Evaluación del Acero de Refuerzo	109
3.6.4. Evaluación de Peraltes	112
3.6.5. Evaluación de Parámetros de la Función Objetivo	116
4. Capítulo IV: Resultados	120
4.1. Momentos Flectores y Reacciones Máximas por Cargas Vivas y Permanentes	120
4.1.1. Momentos Flectores Máximos por Cargas Vivas y Permanentes sin Optimizar y Optimizado	120
4.1.2. Comparación de cargas de diseño para Momentos Flectores Máximos sin Optimizar y Optimizados	122
4.1.3. Reacciones Máximas por Cargas Vivas y Permanentes sin Optimizar y Optimizada	124
4.1.4. Comparación de cargas de Diseño para Reacciones Máximas sin Optimizar y Optimizados	126



4.2. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados	127
4.2.1. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados (por Paso Constante).....	127
4.2.2. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados (por Bisección)	129
4.2.3. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea).....	130
4.2.4. Comparación de Peraltes Optimizados y Sin Optimizar (por varios métodos).....	131
4.3. Comparación de Volúmenes de Concreto Sin Optimizar y Optimizados	132
4.3.1. Comparación de Volúmenes de Concreto Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)	132
4.4. Comparación de las Áreas de Encofrado Sin optimizar y Optimizados	133
4.4.1. Comparación de las Áreas de Encofrado Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)	133
4.5. Comparación de los Pesos del Acero de Refuerzo Sin Optimizar y Optimizados.....	134
4.5.1. Comparación de los Pesos del Acero Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)	134
4.6. Comparación de la función Objetivo Sin Optimizar y Optimizado	136
4.6.1. Comparación de la función Objetivo (Costo Directo Referencial) Sin Optimizar y Optimizado (por Sección Aurea).....	136
5. Capítulo V: Discusión.....	138
5.1. Contraste de Resultados con Referentes al Marco Teórico	138
5.2. Interpretación de los Resultados Encontrados en la Investigación	139
5.3. Comentario de la Demostración de la Hipótesis.....	142
5.4. Aportes de la Investigación.....	143
Glosario.....	145
Conclusiones	150
Recomendaciones.....	153
Referencias.....	156
Anexos	159
Apéndices.....	206



Índice de Tablas

Tabla 1. Longitudes de tramo para diferentes tipos de superestructura	18
Tabla 2. Descripción de los pesos unitarios.....	28
Tabla 3. Factores de presencia múltiple.....	31
Tabla 4. Incremento de carga por factores dinámicos (IM).....	31
Tabla 5. Factores de reducción de resistencia	33
Tabla 6. Combinación de cargas y factores de cargas	34
Tabla 7. Factores para cargas permanentes.....	35
Tabla 8. Peraltes mínimos para superestructuras de profundidades constantes.....	45
Tabla 9. Recubrimientos para las armaduras principales de acero no protegidas.....	45
Tabla 10. Longitudes máximas de tramo para puentes losa	46
Tabla 11. Luces de puentes de concreto construidos.....	46
Tabla 12. Secuencia de Fibonacci para N=0 hasta N=10	66
Tabla 13. Cuadro de Operacionalización de variables	77
Tabla 14. Evaluación de momentos flectores por estado límite de resistencia	99
Tabla 15. Evaluación de momentos flectores por estado límite de servicio	100
Tabla 16. Evaluación de momentos flectores por estado límite de fatiga	101
Tabla 17. Momentos flectores máximos discretizados por varios estados límites.....	102
Tabla 18. Evaluación de fuerzas cortantes máximas por estado límite resistencia	107
Tabla 19. Acero de refuerzo sin optimizar y optimizado (método paso constante).....	110
Tabla 20. Acero de refuerzo optimizado por los métodos bisección y sección aurea.....	111
Tabla 21. Evaluación de los peraltes por optimización del método paso constante	114
Tabla 22. Evaluación de los peraltes por optimización del método de bisección	115
Tabla 23. Evaluación de los peraltes por optimización del método sección aurea	115
Tabla 24. Evaluación de los parámetros de la función objetivo sin optimizar	118
Tabla 25. Evaluación de los parámetros de la función objetivo optimizada	118
Tabla 26. Momentos flectores máximos por cargas vivas y permanentes sin optimizar	120
Tabla 27. Momentos flectores máximos por cargas vivas y permanentes optimizados.....	121
Tabla 28. Reacciones máximas por cargas vivas y permanentes sin optimizar.....	124
Tabla 29. Reacciones máximas por cargas vivas y permanentes optimizadas	125
Tabla 30. Variación porcentual de peraltes sin optimizar y optimizados (paso constante)...	127
Tabla 31. Variación porcentual de peraltes sin optimizar y optimizados (bisección).....	129



Tabla 32. Variación porcentual de peraltes sin optimizar y optimizados (sección aurea)	130
Tabla 33. Variación porcentual del volumen de concreto sin optimizar y optimizados.....	132
Tabla 34. Variación porcentual del área de encofrado sin optimizar y optimizado	133
Tabla 35. Variación porcentual del peso del acero sin optimizar y optimizado	135
Tabla 36. Variación porcentual de la función objetivo sin optimizar y optimizado	136
Tabla 37. Matriz de consistencia	159
Tabla 38. Resultados momentos flectores por resistencia para luces 4.00 a 12.00m.....	162
Tabla 39. Resultados momentos flectores por servicio para luces 4.00 a 12.00m.....	173
Tabla 40. Resultados momentos flectores por fatiga para luces 4.00 a 12.00m	179
Tabla 41. Resultados momentos flectores máximos por resistencia, servicio y fatiga	185
Tabla 42. Resultados áreas de acero sin optimizar y optimizados (paso constante)	185
Tabla 43. Resultados de áreas de acero optimizados (por bisección y sección aurea).....	189
Tabla 44. Resultados de los peraltes optimizados por paso constante	193
Tabla 45. Resultados de los peraltes optimizados por bisección	193
Tabla 46. Resultados de los peraltes optimizados por sección aurea	194
Tabla 47. Resultados de los parámetros de la función objetivo sin optimizar	195
Tabla 48. Resultados de los parámetros de función objetivo optimizado (sección aurea)	196
Tabla 49. Análisis de precios unitarios de concreto $f^c=280\text{kgf/cm}^2$	207
Tabla 50. Análisis de precios unitarios del acero de refuerzo $f_y=4200\text{kgf/cm}^2$	207
Tabla 51. Análisis de precios unitarios del encofrado	208



Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	2
Figura 2. Vista transversal de la Superestructura de un puente losa.....	15
Figura 3. Vista en planta de la Superestructura de un puente losa.....	15
Figura 4. Puente tipo losa de concreto armado de dos tramos, simplemente apoyados.....	18
Figura 5. Sección transversal de un tablero apoyado sobre vigas.....	21
Figura 6. Camión de diseño HL-93.....	29
Figura 7. Tándem de diseño HL-93.....	30
Figura 8. Sobrecarga de carril.....	30
Figura 9. Ancho de franja equivalente paralelo al tránsito.....	37
Figura 10. Disposición de las Franjas equivalentes.....	38
Figura 11. Líneas de influencia de reacciones en una viga.....	41
Figura 12. Líneas de influencia del esfuerzo cortante en una viga.....	42
Figura 13. Líneas de influencia del momento flector en una viga.....	44
Figura 14. Sección crítica por cortante.....	47
Figura 15. Optimización unidimensional y bidimensional.....	59
Figura 16. Diagrama de los campos de optimización.....	60
Figura 17. Diagrama de aproximación asintótica de puntos locales y globales.....	61
Figura 18. Vector de búsqueda del mínimo por el método de paso constante.....	63
Figura 19. Vector de búsqueda del mínimo por el método de la bisección.....	65
Figura 20. Intervalos de búsqueda del Método de Sección Aurea.....	67
Figura 21. Longitud de Intervalos de búsqueda en el Método de Sección Aurea.....	68
Figura 22. Vector de búsqueda del mínimo por el método de la sección aurea.....	69
Figura 23. Flujograma del proceso de investigación.....	80
Figura 24. Interfaz del programa informática Maple 2015, versión educativa.....	94
Figura 25. Interfaz del programa informática AutoCad 2016, versión educativa.....	94
Figura 26. Interfaz de la programación en Maple de la discretización del puente.....	95
Figura 27. Algoritmo del momento flector por peso propio de la losa "DC".....	97
Figura 28. Algoritmo del momento flector por peso de la barrera "DC barrera".....	97
Figura 29. Algoritmo del momento flector por superficie de rodadura "DW".....	97
Figura 30. Algoritmo del momento flector por carga distribuida "LL-Carril".....	97
Figura 31. Algoritmo del momento flector por tándem de diseño "LL-Tándem".....	97



Figura 32. Algoritmo del momento flector por camión de diseño "LL-Camión"	98
Figura 33. Algoritmo del momento flector por Estado Límite Resistencia (Interno)	98
Figura 34. Algoritmo del momento flector por Estado Límite Resistencia (Borde).....	98
Figura 35. Algoritmo del momento flector por Estado límite Servicio (Interno).....	98
Figura 36. Algoritmo del momento flector por Estado límite Servicio (Borde).....	98
Figura 37. Algoritmo del momento flector por Estado límite Fatiga (Interno)	98
Figura 38. Algoritmo de fuerza cortante por superficie de rodadura "VDW"	105
Figura 39. Algoritmo de fuerza cortante por carga muerta "VDC"	105
Figura 40. Algoritmo de fuerza cortante por barrera de seguridad "VDC-Barrera"	105
Figura 41. Algoritmo de fuerza Cortante por carga distribuida "VLL-Carril"	105
Figura 42. Algoritmo de fuerza cortante por tándem de diseño "VLL-Tándem"	105
Figura 43. Algoritmo de fuerza cortante por camión de diseño "VLL-Camión"	105
Figura 44. Algoritmo de fuerza cortante por Estado Límite Resistencia (Interno).....	106
Figura 45. Algoritmo de fuerza cortante por Estado Límite Resistencia (Borde)	106
Figura 46. Algoritmo del área de acero por Estado límite de Resistencia.....	109
Figura 47. Algoritmo del área de acero por Estado límite de Servicio	110
Figura 48. Algoritmo del área de Acero por Estado límite de Fatiga	110
Figura 49. Algoritmo del peralte sin optimización o por predimensionamiento	112
Figura 50. Algoritmo de optimización del peralte por estado límite resistencia	113
Figura 51. Algoritmo de optimización del peralte por estado límite servicio	113
Figura 52. Algoritmo de optimización del peralte por estado límite fatiga.....	113
Figura 53. Algoritmo de optimización del peralte por fuerzas cortantes	113
Figura 54. Algoritmo del parámetro volumen de concreto(m3)	117
Figura 55. Algoritmo del parámetro área de encofrado (m2)	117
Figura 56. Algoritmo del parámetro peso del acero (tnf)	117
Figura 57. Algoritmo del parámetro costo directo referencial (soles)	117
Figura 58. Comparación de momentos flectores sin optimizar y optimizados por cargas	122
Figura 59. Comparación de reacciones máximas sin optimizar y optimizados por cargas ...	126
Figura 60. Comparación de peraltes sin optimizar y optimizados	131
Figura 61. Flujoograma del algoritmo del proceso por optimización matemática	197
Figura 62. Referencia del análisis de precios unitarios	206



1. Capítulo I: Planteamiento del Problema

1.1. Identificación del Problema

1.1.1. Descripción del Problema

El diseño y construcción de puentes tipo losa de concreto armado, son obras de infraestructura civil muy frecuentes que de acuerdo a su funcionalidad se proyectan para salvar luces mayores a 4.60 metros según Art. 2.6.4.2.1.2 del Manual de Puentes (MTC, 2018) y menores a 12.00 metros según (Serquén, 2016). El uso masivo y frecuente, a nivel de todo el territorio nacional, de este tipo de puentes, se debe a las cortas longitudes a salvar, facilidad constructiva, materiales y herramientas de construcción comerciales, mano de obra no necesariamente calificada y un análisis y diseño estructural que se sustenta en formulas y métodos aproximados sencillos.

La sencillez del análisis y diseño estructural de este tipo de elementos podría verse mejorada mediante una optimización matemática. Cuando se realiza el análisis y diseño de puentes tipo losa de concreto armado sin optimizar nuestros cálculos se sujetan a fórmulas empíricas y aproximadas, las cuales poseen un margen de error, por tanto, se tendrán parámetros de diseño sobredimensionados y por ende costos directos elevados; por otra parte, cuando se desarrolla una optimización matemática se procede a encontrar el valor óptimo de una función objetivo dentro de un rango de valores, mediante la aplicación de algoritmos de optimización. Debido a las ventajas que podría otorgar una optimización matemática, se procede a tomar en cuenta dicha metodología mediante optimización y aplicarla a puentes tipo losa de concreto armado.

Esta metodología permitirá evaluar y reducir la variable independiente peralte de la losa y en consecuencia también reducir los valores de los parámetros de diseño como el volumen del concreto, peso del acero, área de encofrado y el costo directo referencial que dependen directamente del peralte. En esencia ver el comportamiento que genera un peralte de losa optimo en los costos directos referenciales (función objetivo), donde el óptimo es la tendencia al mínimo.

A ello también se suma que nuestro manual de Puentes del MTC 2018 no especifica ni sugiere el uso de algún tipo de metodología relacionada a la optimización matemática, conduciéndonos al interés, estudio e implementación de este tipo de metodologías poco relevantes, muy teóricas y poco aplicativas.



1.1.1.1. Ubicación Geográfica

El área de estudio abarca todo el país del Perú, todas los departamentos, provincias y distritos del Perú, el cual se encuentra posicionado en el hemisferio sur, en la costa occidental de América del sur, abarcando una superficie terrestre de 1.285.215,6 Km², su posición geográfica está comprendida por la latitud 10°00' S y longitud 76°00' O. Por el norte limita con Ecuador y Colombia, por el sur con Chile, por el este con Brasil, por el Sureste con Bolivia y por el oeste con el océano pacifico.

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio



Nota: Adaptado de Latitud y Longitud de Perú, Mapas del Mundo, 2013,
<http://mapadeperu.blogspot.com/2013/05/mapa-de-peru-para-descargar.html>



1.1.1.2. **Ámbito de Influencia Teórica**

La presente tesis de Investigación está enmarcada dentro de la especialidad de Puentes, rama de estructuras de Ingeniería Civil, el investigador se valdrá de herramientas procesadoras de información con fines educativos como Maple 15 v.15.0, Microsoft Office 2016 v.16.0, AutoCad 2016 v.20.1.49.0 y hojas de cálculo en Excel 2016. Como guía de trabajo se utilizará, manuales, reglamentos, fichas, otras tesis, libros, páginas de internet, afines al tema de investigación.

1.1.2. **Formulación del Problema**

1.1.2.1. **Formulación Interrogativa del Problema General**

¿Cuál es la diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?

1.1.2.2. **Formulación Interrogativa de los Problemas Específicos**

Problema específico 01. ¿Puede la función objetivo ser función solamente del peralte de la losa para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?

Problema específico 02. ¿Cuál es la diferencia de peraltes entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?

Problema específico 03. ¿Cuál es la diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?

Problema específico 04. ¿Cuál es la diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?

Problema específico 05. ¿Cuál es la diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?



Problema específico 06. ¿Cuál es la diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?

1.2. Justificación e Importancia de la Investigación

1.2.1. Justificación Técnica

La presente tesis de investigación está enmarcada dentro de la rama de estructuras de la Ingeniería Civil, especialidad Puentes, la cual plantea una metodología mediante optimización estructural en puentes tipo losa de concreto armado, que el manual de puentes del MTC 2018 no toma en cuenta, de tal manera que al reducir los parámetros de diseño estructural (peralte, volumen del concreto, área de encofrado, peso del acero y costo final), se tendrá un ahorro que se verá reflejado en el costo directo referencial final a nivel de estructuras para este tipo de elementos.

1.2.2. Justificación Social

Para todo estudiante de la Universidad Andina del Cusco que desee estudiar temas relacionados a la optimización estructural en puentes tipo losa de concreto armado, tenga presente esta investigación.

A todo profesional ingeniero civil, que deseen o busquen la aplicabilidad de una metodología de optimización estructural en puentes tipo losa de concreto armado, clara y sencilla ciñéndonos a las especificaciones del manual de puentes del MTC 2018.

A nuestra sociedad ya que al diseñar una infraestructura civil esta genera un impacto en la sociedad, que generalmente se reflejan en la funcionalidad y los costos, por tanto, nuestra metodología propone una forma de optimizar (minimizar los costos), conduciéndonos a un ahorro económico a nivel de presupuestos, en donde finalmente tales recursos excedentes podrán ser destinados hacia otros tipos de obras civiles. Teniendo como bien común el beneficio de nuestra sociedad.

1.2.3. Justificación por Viabilidad

Desde el punto de vista económico es factible, porque no necesita gran cantidad de recursos y/o servicios, por tratarse de un trabajo netamente teórico y numérico. Por ello todo el análisis es a través de sistemas de información y procesadores de datos (para fines educativos se



necesita la instalación de programas informáticos como Maple 15 v.15.0 y AutoCad 2016 v.20.1.49.0, normas técnicas como el Manual de Puentes del MTC 2018 y AASHTO LRFD 2017.

1.2.4. Justificación por Relevancia

Son muy pocos los temas relacionados a la optimización estructural en puentes tipo losa, así como la falta de metodologías aplicativas claras y sencillas. Es cierto que existen metodologías de optimización a nivel de maestría y doctorado, pero estas resultan ser muy teóricas y complejas. Es por ello el interés de abordar el tema, presentado un proceso metodológico muy aplicativo claro y sencillo, el cual nos permite optimizar (reducir los parámetros de diseño estructural que nuestro manual de puentes del MTC 2018 especifica) como consecuencia se tendrá un costo directo referencial reducido a nivel presupuestal.

1.3. Limitaciones de la Investigación

1.3.1. Limitaciones de Estudio

El estudio de investigación se limita a puentes tipo losa de concreto armado isostáticos simplemente apoyados, que se proyectan al análisis y diseño en todo el territorio nacional mediante el manual de Puentes del MTC 2018.

1.3.1.1. Limitaciones en el Análisis y Diseño

- Se limita a una metodología de análisis y diseño estructural, por métodos aproximados del Manual de puentes MTC 2018. Se ha optado por este método ya que nos permitirá evaluar directamente las fórmulas analíticas.
- Se limita al método aproximado del Ancho Equivalente de franjas (franjales interiores y de borde) del Manual de puentes MTC 2018.
- Se limita a un análisis y diseño únicamente a nivel de la superestructura (tableros de concreto armado).
- Se limita a una carga vehicular HL-93, con un camión de diseño tipo tándem.
- Se limita a un análisis por momentos flectores, fuerzas cortantes y deflexiones.
- Se limita a una optimización matemática por métodos de búsqueda lineal en una dimensión de una sola variable (búsqueda de un punto en una función lineal) del valor



mínimo, con algoritmos de optimización como: Paso Constante, Bisección y Sección Aurea.

- Se limita a un análisis por optimización únicamente a nivel de la variable peralte de la losa.
- Se limita al diseño de los parámetros dependientes (volumen del concreto, área de encofrado, peso del acero y costo directo referencial) solamente del peralte optimizado.
- Se limita a determinar y comparar los parámetros de la función objetivo (volumen del concreto, área de encofrado y peso del acero) para diferentes longitudes de un puente.
- Se limita al desarrollo y procesamiento de información en programas como Excel 2016 v.16.0, AutoCad 2016 v.20.1.49.0 y Maple 15 v.15.0 (estos programas son utilizados solo con fines educativos), toda la programación se realizará en el software Maple 15.

1.3.1.2.Limitaciones en las Propiedades de Geometría

- Se limita para luces mayores a 4.60 m según estipula el Art. 2.6.4.2.1.2 del Manual de Puentes (MTC, 2018).
- Se limita para luces menores a 12.00 m según estipula el estudio de (Serquén, 2016).
- Se limita al estudio de luces comprendidas entre: 4.00 m, 4.50 m, 5.00 m, 5.50 m, 6.00 m, 6.50 m, 7.00 m, 7.50 m, 8.00 m, 8.50 m, 9.00 m, 9.50 m, 10.00 m, 10.50 m, 11.00 m, 11.50 m y 12.00 m.
- Se ha discretizado (dividido) cada longitud del puente en 10 partes, para su mejor evaluación y análisis.
- Ancho total de la sección transversal (incluye calzada y barreras) de 8.40 m
- Espesor de la carpeta asfáltica de 5.00 cm.
- Recubrimiento general (todas las caras) de 2.50 cm.
- Ancho de la barrera de protección de 0.40 m.
- Diámetro del acero de refuerzo principal asumido de 2.54 cm (1.00 in)
- Ancho del dispositivo de apoyo - neopreno de 0.30 m.

1.3.1.3. Limitaciones en las Propiedades Físico - Mecánicas

- Peso específico del concreto de 2.40 Ton/m³



- Peso específico del asfalto de 2.20 Ton/m³
- Peso específico del acero de 7.85 Ton/m³
- Peso de la barrera de protección de 0.600 Ton/ml
- Peso de la carga distribuida del carril de 0.954 Ton/ml
- Peso de la carga puntual por eje del tándem de diseño 11.34 Ton
- Resistencia a la compresión del Concreto de 280.00 kg/cm²
- Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo de 4200.00 kg/cm²

1.3.1.4. Limitaciones en los Costos

- Se limita a una evaluación de costo a nivel de estructuras.
- Se limita a una evaluación de costo únicamente a nivel de la superestructura (tableros de concreto armado).
- Análisis de precio unitario del concreto por m³, es S/. 457.93 soles (valor referencial).
- Análisis de precio unitario del encofrado por m², es S/. 59.50 soles (valor referencial).
- Análisis de precio unitario del acero por Ton, es S/. 4,660 soles (valor referencial).

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.

1.4.2. Objetivos Específicos

Objetivo específico 01. Determinar la función objetivo para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.

Objetivo específico 02. Calcular la diferencia de peraltes entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.



Objetivo específico 03. Calcular la diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.

Objetivo específico 04. Calcular la diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.

Objetivo específico 05. Calcular la diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.

Objetivo específico 06. Calcular la diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.



2. Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Tesis o Investigación Actual

2.1.1. Antecedentes a Nivel Nacional

2.1.1.1. Antecedente Nacional 01

Tesis de maestría denominada: “**Optimización de la disposición de las péndolas de un puente tipo arco enmallado de 92.00 metros**”. Universidad Nacional de Ingeniería, **Autor: Esteban Alfredo Ortiz Bosmans, Lima - Perú (2012)**.

Resumen: Un arco enmallado es una alternativa muy competitiva en comparación con arcos atirantados y reticulados ya que aprovecha las cualidades de ambas estructuras. Se propone un puente tipo arco enmallado como solución para salvar una luz de 92.00 m. A partir de un diseño previo. Se estudia la influencia que puede ejercer modificar el número e inclinación de las péndolas en el comportamiento del arco enmallado, para así obtener una mejor solución. Con este estudio se ponen en evidencia algunas de las ventajas de este tipo de puente.

Para reducir el esfuerzo computacional del análisis estructural se realiza previamente una simplificación de los modelos estructurales del puente a utilizar, mediante la transformación de un modelo tridimensional a uno bidimensional. Seguidamente, mediante el uso del modelo simplificado, se realiza la búsqueda de una mejor solución para la disposición de las péndolas del arco enmallado, de acuerdo a un patrón específico. Se comparan los costos que resultan del análisis y diseño de varios casos estudiados, hasta que la reducción de dicho costo tenga poca variación. Finalmente, se verifica si el resultado obtenido es válido y cumple con las principales condiciones de diseño.

Conclusiones: En el puente tipo arco enmallado analizado, las péndolas tienen una disposición óptima tal que mejora el comportamiento de la estructura reduciendo las flexiones en los arcos y el tirante. Al realizar una comparación económica parcial del costo del puente, se ha obtenido que si se usan 52 péndolas por arco que formen 32° con el radio del mismo, el costo no varía en más del 0.1%.

El costo del puente resultó ser muy sensible a los cambios en el ángulo que hacen las péndolas con el radio del arco. Usar un menor ángulo hará que las péndolas no arriostren efectivamente al arco y al tirante, ya que su comportamiento se acercará más al de un arco atirantado y que al de varios reticulados uno sobre otro. Usar un mayor ángulo también hará que las péndolas



no arriostren efectivamente al arco y el tirante, debido a que se aumentará la posibilidad de que las péndolas dejen de estar en tracción.

El costo del puente no resultó ser muy sensible a los cambios en el número de péndolas. Sin embargo, se puede concluir que usar un mayor número de péndolas aumentará el costo debido al aumento de la longitud total de las péndolas. Usar un menor número de péndolas, aumentará el costo debido a la reducción en el arriostramiento contra la flexión vertical del arco y el tirante.

Aporte: De la tesis expuesta se extrae; la optimización estructural por la cantidad y disposición de las péndolas en un puente tipo arco enmallado a nivel del diseño, de los resultados se concluye que, al optimizar la cantidad de péndolas, genera un incremento en costos respecto de otro sin optimizar, así también la variación del ángulo que hacen las péndolas con el radio del arco es muy sensible, en cuanto al comportamiento estructural.

2.1.1.2. Antecedente Internacional

Tesis doctoral denominada: “**Optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados**”. **Universidad Politécnica de Valencia, Autor: Julián Alcalá Gonzáles, Valencia - España (2009).**

Resumen: Los tableros en puentes losa de concreto pretensado son una tipología habitualmente empleadas en puentes de España, para resolver estructuras de pasos superiores. Su optimización presenta un gran interés para conseguir diseños más económicos, que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos que requieren. Sin embargo, la optimización de este tipo de estructuras apenas ha sido objeto de atención por parte de los investigadores en optimización estructural.

El objetivo de este trabajo ha sido el de aplicar técnicas de optimización metaheurísticas a esta tipología. Según (Osman, 1996) este tipo de técnicas metaheurísticas o heurísticas, son procesamientos por métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, proporcionando un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la mecánica estadística. Los algoritmos de optimización implementados, están basados en tres etapas, denominados algoritmos de mejora local: *cristalización simulada (SA)*, *aceptación por umbrales (TA)*, y *algoritmo del solterón (OBA)*, que han resultado eficaces para la optimización de otras tipologías estructurales de concreto.



Los resultados de optimización muestran las siguientes características: los tableros aligerados son siempre más económicos que los macizos, incluso para menores luces (17.00 m); los tableros optimizados mejoran en un 13% los costos medios estimados de estructuras reales; y finalmente, los tableros optimizados muestran cuantías de concreto bajas, esbelteces y cuantías de armadura activa moderadas, y cuantías relativamente altas de armadura pasiva.

Conclusiones:

De la Optimización: Los algoritmos implementados, basados en tres técnicas metaheurísticas, han resultado ser muy eficaces para la optimización de la tipología estructural propuesta. La implementación de las metaheurísticas ha confirmado que el número de variables que deben modificarse para conseguir el movimiento más eficaz es del 20%.

Los algoritmos SA y TA son similares en sus resultados. Cualquiera de ellos puede ser adecuado para la optimización de tableros. La calidad de los algoritmos es potencialmente muy alta, a tenor de las pequeñas desviaciones que se producen entre los mejores resultados alcanzados y las estimaciones de costos óptimos que se obtienen aplicando la Teoría de Valores Extremos. El algoritmo OBA no ha logrado superar a los dos anteriores, tal vez por haber implementado su versión más simple.

De los Tableros optimizados: Para luces de 17.00 m o más, los tableros más económicos son los aligerados. Los tableros macizos superan el costo de los aligerados en, al menos, un 2.6%, pero se puede llegar a un exceso de hasta el 6.5% en las luces mayores.

Los tableros aligerados optimizados presentan una tendencia clara a mantener cuantías de concreto muy bajas. Los tableros macizos, por el contrario, tienen cuantías más variables, dependiendo de la luz del vano principal.

Las cuantías de acero activo y pasivo son más dispares. La primera ha mantenido valores bajos. Este dato puede estar relacionado con las esbelteces, porque con cantos generosos es posible reducir el pretensado. Las cuantías de acero pasivo, por el contrario, han sido relativamente altas, correspondiendo un 75-80% a la armadura transversal.

Aporte: De la tesis expuesta se extrae; la aplicación de técnicas de optimización metaheurísticas para tableros losa pretensados (solo para la superestructura). Se aplican tres tipos de optimización metaheurística, resultando los más eficaces en cuanto a optimizar el costo final, los algoritmos de *cristalización simulada* (SA) y *aceptación por umbrales* (TA),



en los resultados encontrados se observa que los tableros optimizados presentan volúmenes de concreto bajos y cuantías de aceros altas, en tanto estos tableros optimizados mejoran un 13% respecto a otros tableros no optimizados, a nivel del costo final.

2.1.1.3. Antecedente Internacional

Artículo de investigación denominada: **“Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos”**. Universidad Politécnica de Valencia, Autores: J.V. Martí, V. Yepes, F. Gonzáles-Vidosa y A. Luz, Valencia - España (2013).

Resumen: Este artículo se ocupa del diseño automático de tableros de puentes de vigas artesa pretensadas prefabricadas de costo mínimo, empleando para ello un algoritmo memético híbrido que combina la búsqueda poblacional de soluciones mediante algoritmos genéticos y una búsqueda por entornos variables. Este algoritmo se aplica a un puente formado por 2 vigas isostáticas con luces entre apoyos de entre 20.00 m y 40.00 m y una losa de 12.00 m de ancho. La estructura analizada consta de 40 variables discretas. El módulo de la evaluación considera los estados límite último y de servicio que se aplican habitualmente para estas estructuras: flexión, cortante, torsión, fisuración, flechas, etc. Cada una de las heurísticas se procesa 12 veces, obteniéndose información estadística sobre el valor mínimo, el medio y las desviaciones. El estudio paramétrico muestra una buena correlación del costo, del número de torones y de las cuantías de acero pasivo y concreto de la viga. Se han comprobado ahorros de entre el 8 y el 50% respecto a otras estructuras realmente ejecutadas.

El procedimiento presentado permite la aplicación práctica al diseño real y su adaptación al proceso de prefabricación.

Conclusiones: El trabajo presenta un algoritmo memético que realiza una hibridación entre un algoritmo genético y un algoritmo (VDNS) de búsqueda local aplicado con éxito al diseño automático y a la optimización del costo de tableros de puentes isostáticos de vigas artesa pretensadas prefabricadas. Este algoritmo, ejecutado varias veces, proporciona escasas variaciones respecto a la media de los valores encontrados, alcanzando buenas soluciones, incluso en el caso de una sola ejecución. Del estudio paramétrico realizado para luces comprendidas entre 20.00 m y 40.00 m, se ha comprobado un fuerte ajuste lineal del canto con la luz, con valor medio de $L/18.08$. El espesor medio de la losa resultante es de apenas 0.184 m, de forma que las soluciones optimizadas tienden a reducir al máximo el peso de la



estructura, pues los espesores de alas y el alma de la viga también son muy reducidos. La resistencia característica del concreto en la viga es superior al de la losa, con valores medios de 37.75 y 30.17 MPa, respectivamente, no habiendo sido necesario llegar hasta la máxima resistencia posible de 50 MPa. La cuantía de armadura pasiva y el volumen por unidad de superficie necesaria en la viga crecen con la luz. Son necesarios, como valores medios, 40.39 kg de armadura pasiva y 0.288 m³ de concreto por cada metro cuadrado de tablero de puente. Por último, los resultados muestran que el algoritmo es capaz de reducir el costo de modo significativo, en torno al 8%, para este tipo de estructuras que se encuentran altamente industrializadas. Sin embargo, se han encontrado ahorros que pueden llegar al 50% en algunos casos realmente ejecutados.

Aporte: De la tesis expuesta se extrae; un planteamiento de una metodología de optimización mediante algoritmos genéticos y algoritmos de búsqueda local por entornos variables (VDNS), un método de optimización muy sofisticado, donde el objetivo principal es el de encontrar un costo mínimo (optimización económica), en el diseño estructural de tableros y vigas artesa prefabricadas, para puentes de entre 20.00 m y 40.00 m de longitud, obteniendo como resultados ahorros entre el 8%.

2.1.1.4. Antecedente Internacional

Artículo de investigación denominada: **“Optimización de Estructuras Metálicas para puentes mediante Algoritmos Genéticos con el programa PUENFLEX Ver. 2.0”**. Universidad de Sao Paulo, Autor: Ladislao R. Ticona Melo, Ricardo Oliveira, Raúl Echegaray y Túlio N. Bittencourt, Sao Paulo - Brasil (2010).

Resumen: El cálculo y dimensionamiento de un proyecto estructural es un proceso iterativo y lleva implícito la búsqueda de una solución óptima, es decir, una solución que cumple las diversas condiciones de funcionalidad y seguridad a un costo mínimo. Los algoritmos genéticos (AGs) son métodos adaptivos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción y el principio de supervivencia del más apto. Así, en los últimos años los conceptos de AGs se han estado estudiando y usando en diversas áreas de la ingeniería de manera satisfactoria. Para el presente trabajo, fue implementado un aplicativo con programación orientado a objetos C++ Builder denominado PUENFLEX, el mismo que se caracteriza por realizar cálculo de estructuras planas por el método de las rigideces y la posterior optimización de la misma. Además, fue desarrollado un ejemplo de optimización de una estructura metálica de un puente, sometido a una carga



estática. El objetivo de los algoritmos genéticos es determinar las dimensiones de los elementos estructurales del puente, para obtener una estructura de bajo peso, que cumpla con los requerimientos de resistencia y cumpla las deflexiones máximas permitidas por las normas de diseño de puentes. El software desarrollado puede ser recomendado como una alternativa educativa para el estudio de cursos de optimización y análisis estructural, ya que presenta una interfaz gráfica amigable.

Conclusiones: El uso de algoritmos genéticos es un recurso útil para la reducción de costos en procesos de industrialización y es de fácil implementación. La selección de los AGs para la solución del problema en estudio es adecuada, principalmente porque la función objetivo no es continua. La mayor dificultad encontrada hasta el momento es que para luces de puente considerables, el algoritmo planteado no converge rápidamente y requiere de mucha memoria para ejecutar los cálculos. Por lo tanto, se pretende mejorar el algoritmo de búsqueda para futuros estudios. Los AG no son métodos exactos de solución de problemas, pero se aproximan mucho a la solución óptima, esto es debido desde luego a su naturaleza evolutiva, que por otro lado ofrece gran robustez para la solución de problemas complejos.

Aporte: De la tesis expuesta se extrae; un planteamiento de una metodología de optimización mediante algoritmos genéticos (optimización de los elementos componentes de la superestructura) para puentes con armadura metálica, cuyo objetivo principal es el de encontrar elementos livianos de bajo peso y que cumplan los requerimientos mínimos de diseño en un programa informático PUENFLEX 2.0.

2.2. Aspectos Teóricos Pertinentes

2.2.1. Definición de Puente

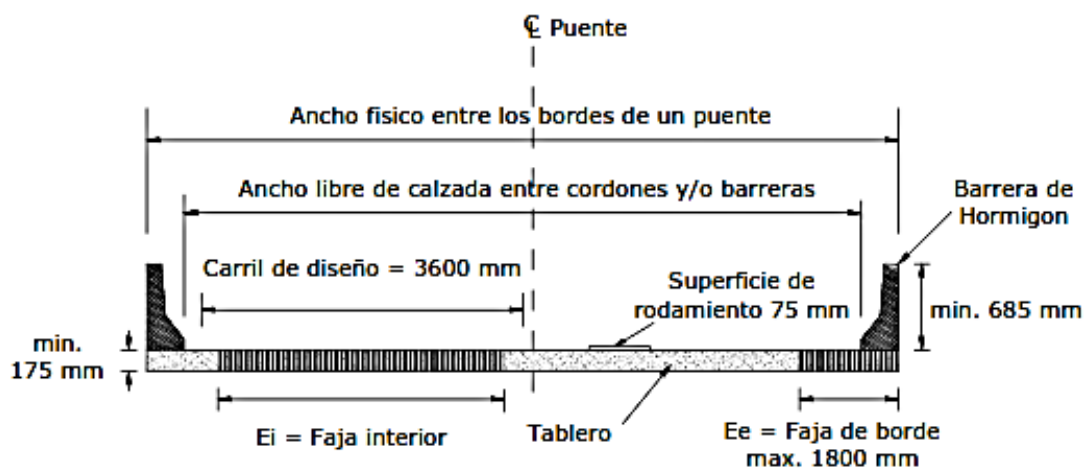
Obras de arte destinadas a salvar corrientes de agua, depresiones del relieve topográfico, y cruces a desnivel que garanticen una circulación fluida y continua de peatones, agua, ductos de los diferentes servicios, vehículos y otros que redunden en la calidad de vida de los pueblos. Los puentes que soportan un canal o conductos de agua se denominan acueductos, los que son proyectados y construidos sobre superficies secas o en valles, viaductos. Los que interceptan autopistas y vías férreas se denominan pasos elevados o a desnivel. (AASHTO, 1996).

2.2.1.1. Componentes de un Puente

2.2.1.1.1. Superestructura

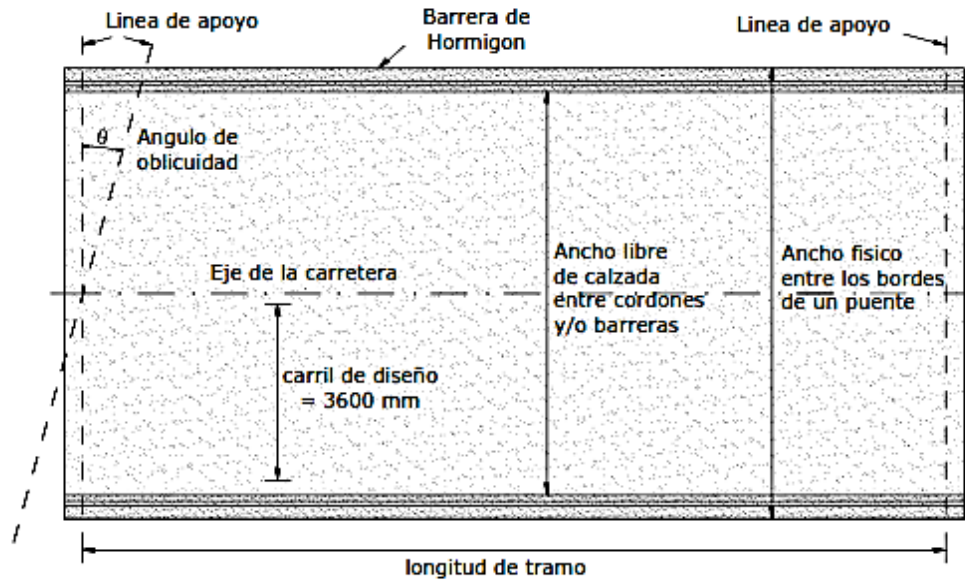
- *El tablero*, constituido por losas de concreto, enmaderado o pisos metálicos, el cual yace sobre apoyos directamente o en vigas principales, transversales, largueros y/o viguetas transversales de manera indirecta, para luego transmitir las cargas a los apoyos.
- *Estructura portante o estructura principal*, elemento resistente principal de un puente, en un puente tipo losa sería la misma losa (téngase en cuenta que la losa se comportara como una viga simplemente apoyada isostáticamente), en un puente colgante serían los cables, en un puente en tipo arco sería el anillo que forma el arco, etc. También forman parte de esta las vigas, diafragmas, veredas, postes, pasamanos o barandas, las barreras de protección, parapetos, la superficie de rodadura, para el caso de puentes ferroviarios los rieles y los durmientes.
- *Elementos complementarios*, como otros tipos de superficie de rodadura, barandas combinadas, barreras de desviación, señales, entre otros (AASHTO LRFD, 2017).

Figura 2. Vista transversal de la Superestructura de un puente losa



Nota: Adaptado de Apoyo didáctico en la asignatura de puentes CIV 312 texto estudiante, (Ramirez Coria, 2010), Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, carrera de Ingeniería Civil

Figura 3. Vista en planta de la Superestructura de un puente losa



Nota: Adaptado de Apoyo didáctico en la asignatura de puentes CIV 312 texto estudiante, (Ramirez Coria, 2010), Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, carrera de Ingeniería Civil

2.2.1.1.2. Subestructura o Infraestructura

Compuesta por estribos y pilares.

- *Estribos*, elemento estructural de apoyo ubicados en los extremos del puente, la función principal es la de transferir cargas del tablero hacia el terreno y que también sirven además para contener el empuje de tierras de los accesos al puente.
- *Pilares*, elemento estructural ubicados entre los apoyos extremos, por lo general son apoyos intermedios, es decir, reciben reacciones de dos tramos de un puente, transmitiendo cargas al terreno.
- *Cimentaciones*, Se encuentran bajo el terreno de la superficie son encargados de transmitir toda la carga al suelo (AASHTO LRFD, 2017).

2.2.1.1.3. Elementos Auxiliares

Son elementos que sirven de unión entre la superestructura y la subestructura, varían con la clasificación del puente, entre las obras complementarias se disponen: dispositivos o aparatos de apoyo disipadores de energía, péndolas, rotulas, vigas de rigidez, barandas, separadores, bermas, losas de transición, cortinas y alas, obras de iluminación, obras de señalización, drenaje, obras de captación, pavimentación, entre otros.



2.2.2. Clasificación de Puentes

(Seminario Manrique, 2004), clasifica los puentes de la siguiente manera:

Según la naturaleza de la vía soportada: estos se clasifican en Puentes para carretera o carreteros, para ferrocarril o ferroviarios, para trenes eléctricos de pasajeros, para acueductos, para peatones (puentes peatonales) y los puentes para aviones que existen en los aeropuertos.

Según el Material: Se clasifican en: puentes de piedra, de madera, de sogas (artesanales), de hierro, de acero, de concreto armado, de concreto preesforzado, de concreto postensado y de materiales compuestos (metal con concreto, o la combinación de materiales).

Según el sistema estructural Principal:

- **Puentes tipo viga o Viga Losa.** Pueden ser de tramos simplemente apoyados, tramos isostáticos tipo Gerber o cantiléver, tramos hiperestáticos o continuos. En los puentes tipo viga, el elemento portante principal está sometido principalmente y fundamentalmente a esfuerzos de flexión y de corte.

- **Los Puentes en arco.** Pueden ser de muy diversas formas, como la de tablero superior, de tablero intermedio y de tablero inferior, el elemento principal está sometido principalmente a esfuerzos de tensión y torsión.

- **Los Puentes suspendidos.** Pueden ser colgantes, atirantados o una combinación de ambos sistemas.

Según la forma de la geometría en planta: Los puentes pueden ser rectos, esviados y curvos.

Según el tiempo de vida: Se clasifican en *Puentes definitivos* (aquellos que son diseñados para una vida en servicio de 75 años) y *Puentes temporales* (cuya utilización debe ser por un tiempo limitado no mayor de 5 años, dentro de estos puentes se consideran los puentes provisionales, de desvío y de emergencia).

Según la demanda de tránsito y clase de la carretera: De acuerdo al volumen de tránsito tenemos los Puentes para Autopistas de Primera Clase y de Segunda Clase, los puentes para Carreteras de 1ra. Clase, de 2da. Clase y de 3ra. Clase y finalmente los puentes para Trochas Carrozables o de bajo de tránsito.



2.2.3. Puentes Losa

La losa es un elemento estructural cuyo espesor es menor que sus otras dimensiones y sobre la cual, las cargas actuantes, incluido su peso propio, son perpendiculares a su plano medio. La losa es el elemento principal sometido a fuerzas de flexión y corte producto de cargas vivas y permanentes. Atendiendo a sus propiedades mecánicas ellas se dividen en:

- Losas Isotrópicas: son aquellas que poseen propiedades mecánicas similares en todas sus direcciones.
- Losas Ortotrópicas: poseen propiedades mecánicas diferentes en dos direcciones ortogonales.
- Losas Anisotrópicas: poseen distintas propiedades mecánicas en todas las direcciones (Seminario Manrique, 2004).

2.2.3.1. Puentes Tipo Losa de Concreto Armado

Este tipo de puentes son usados especialmente para luces menores a los 7.00 metros en puentes carreteros y 5.00 metros en puentes ferroviarios, pudiendo llegar a luces de 12.00 metros con concreto armado y hasta los 35.00 metros con preesforzado y postensado, siendo útiles para salvar luces cortas (CivilGeeks, 2014).

Tabla 1. Longitudes de tramo para diferentes tipos de superestructura

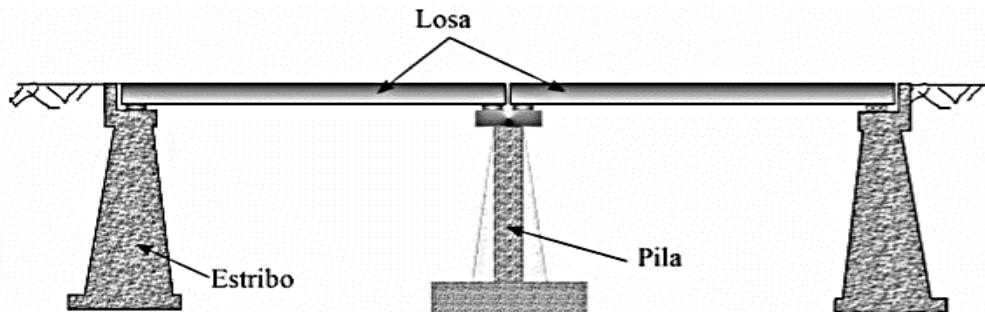
Tipo Estructural	Material	Rango de tramo, m.	Máximo tramo en servicio, m.
Losa	Concreto	0-12	
Viga	Concreto	12-300	301, Stolmasundet, Norway, 1998

Nota: Esta tabla muestra el rango por longitud para un tipo estructural de un puente, adaptado de (AASHTO LRFD, 2017), American Association of State Highway and Transportation Officials

2.2.3.1.1. Tipos de puentes losa

- A) De uno o más tramos de losa, simplemente apoyados sobre estribos y/o pilares. Este tipo se denominan losas simples.

Figura 4. Puente tipo losa de concreto armado de dos tramos, simplemente apoyados.



Nota: Adaptado de Diseño de Puentes AASHTO (CivilGeeks, 2014), CivilGeeks.com: file:///C:/Users/user/Downloads/Libro-de-Puentes-AASHTO%20(2).pdf

- B) De losa continua extendiéndose sobre tres o más apoyos, pero sin que esta forme una sola sección con estos. Este tipo de losa se denomina losa continua y puede ser de espesor constante o variable y en este último caso la variación de espesor puede ser lineal o parabólica.
- C) De losa continua la cual este unida con sus apoyos, en uno o más tramos, constituyendo una losa en pórtico. En este caso el espesor es mayormente variable salvo que se trate de losas de luces inferiores a 6.00 metros por cada tramo. Este tipo de puentes también es denominado puente pórtico de marco rígido (CivilGeeks, 2014).

2.2.3.1.2. Características generales

Los puentes losas requieren por lo general más acero y más concreto, pero su encofrado es mucho más sencillo, siendo algunas veces mayor la economía representada por la facilidad de ejecución del encofrado que el costo de la mayor cantidad de material.

A medida que se incrementa la luz del puente, también la diferencia entre la cantidad de los dos tipos de materiales va aumentando y no así la diferencia del costo del encofrado, existiendo así por lo tanto un límite a nivel económico para el empleo de los puentes losas. Este límite depende del costo relativo de los materiales (acero, cemento y agregados) al costo del encofrado. Es por eso que el límite esta entre los 7.00 a 12.00 metros (CivilGeeks, 2014).

2.2.3.1.3. Características de diseño

El diseño de los puentes losa debe efectuarse basándose únicamente en los momentos producidos por cargas, no siendo necesario comprobar en la losa el esfuerzo cortante, ni la adherencia ya que la losa actúa como una viga ancha en donde la cortante es asumida por el ancho de la losa del concreto, el diseño se hace basándose en fórmulas dadas para un



determinado ancho efectivo. El cálculo de los momentos debe hacerse separadamente para el peso propio y la carga viva, tomando en ambos casos una faja de losa de un ancho de unidad.

Para la estimación del peso propio el espesor de la losa puede tomarse aproximadamente como $L_c/20$ para losas mayores de 6.00 metros y $L_c/15$ para luces menores o usar las fórmulas recomendadas por la AASHTO (AASHTO LRFD, 2017).

Los puentes losa pueden ser analizados estáticamente mediante Métodos de Análisis Aproximados, Métodos de Análisis Refinados, las cuales forman parte de las Especificaciones AASHTO LRFD. Dentro los Métodos de Análisis Aproximados, encontramos el método de fajas equivalentes el cual consiste en dividir el tablero en fajas perpendiculares a los componentes de apoyo, estas fajas son interiores y de borde, las fajas se deberán tomar para el cálculo de solicitaciones como vigas continuas o como vigas simplemente apoyadas. Para determinar las solicitaciones en la faja se deberá suponer que los componentes de apoyo son rígidos. La faja de borde no se deberá tomar mayor a 1800.00 mm (Ramirez Coria, 2010).

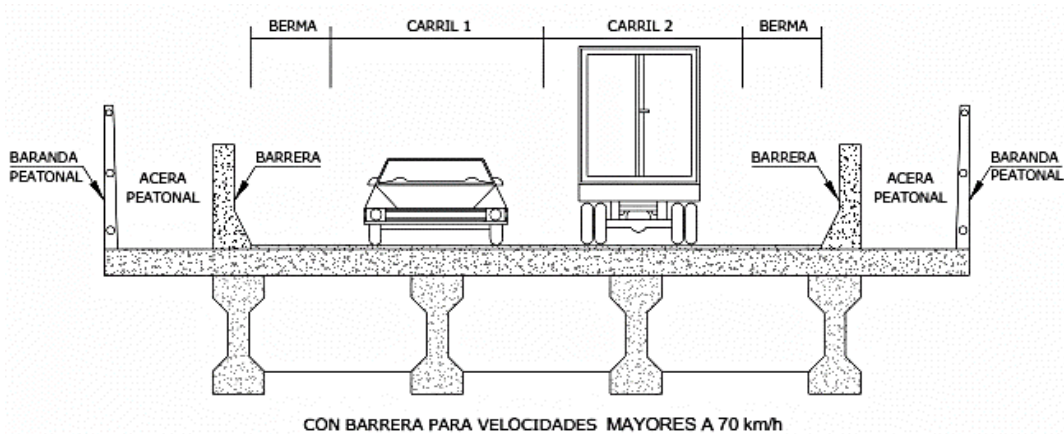
2.2.4. Geometría

A) Sección Transversal: El ancho de la calzada, que es parte de la sección transversal del tablero del puente, no será menor que el ancho del camino de acceso al puente el cual está constituido por el número de los carriles de circulación más las bermas. Deberá contener los siguientes elementos: vías de tráfico, vías seguras, veredas, ciclovías, elementos de protección (barreras y barandas) y elementos de drenaje. Se entiende por calzada el ancho libre entre sardineles de veredas y/o elementos de protección.

Además, por consideraciones de drenaje del tablero, las Secciones transversales deberán ser en lo posible de un solo tipo y establecer: Pendientes transversales no nulas y pendiente transversal mínima de 2% (2.00 cm/m), para las superficies de rodadura.

Se deberá poner aceras o veredas para el flujo peatonal en todos los puentes, tanto en zonas rurales como en zonas urbanas. Además, se establece que el ancho mínimo de las veredas para velocidades de diseño menores a 70 km/h debe ser 1.20 m. efectivo, es decir sin incluir el ancho de barandas ni de barreras. De igual modo para velocidades de diseño mayores a 70 km/h deberán tener 1.50 m de ancho mínimo efectivo y estar protegidas por barreras (MTC, 2018).

Figura 5. Sección transversal de un tablero apoyado sobre vigas



Nota: Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

B) Ancho de Vía (calzada): Siempre que sea posible, los puentes se deben construir de manera de poder acomodar el carril de diseño estándar y las bermas adecuadas. El número de carriles de diseño, según (AASHTO LRFD, 2017) Art. 3.6.1.1.1, se determina tomando la parte entera de la relación $w/3.6$, siendo w el ancho libre de calzada (m). Cuando las vías de tráfico tienen menos de 3.60 m el número de vías de diseño se toma igual al número de vías de tráfico.

Los anchos de calzada entre 6.00 y 7.20 m tendrán dos carriles de diseño, cada uno de ellos de ancho igual a la mitad del ancho de calzada.

C) Bermas: Una berma es la porción contigua al carril que sirve de apoyo a los vehículos que se estacionan por emergencias. Su ancho varía desde un mínimo de 0.60 m en carreteras rurales menores, siendo preferible 1.80 a 2.40 m, hasta al menos 3.00 m, y preferentemente 3.60 m, en carreteras mayores. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que anchos superiores a 3.00 m predisponen a su uso no autorizado como vía de tráfico (AASHTO LRFD, 2017).

D) Veredas: Son utilizadas con fines de flujo peatonal o mantenimiento. Para velocidades de hasta 70 km/h es posible colocar veredas directamente, en cambio para velocidades mayores se deben agregar barreras para proteger el tránsito peatonal. El ancho mínimo de las veredas es 1.00 m. En zonas urbanas las veredas peatonales deben tener como mínimo 1.50 m de ancho (AASHTO LRFD, 2017).



E) Barandas: Se instalan a lo largo del borde de las estructuras de puente cuando existen pases peatonales, o en puentes peatonales, para protección de los usuarios. La altura de las barandas será no menor que 1.10 m, en ciclovías será no menor que 1.40 m.

Una baranda puede ser diseñada para usos múltiples (caso de barandas combinadas para peatones y vehículos) y resistir al choque con o sin la acera. Sin embargo, su uso se debe limitar a carreteras donde la velocidad máxima permitida es 70 km/h. Para velocidades mayores, a fin de proteger a los peatones es preferible utilizar una barrera de concreto (AASHTO LRFD, 2017).

F) Barreras de Concreto: Su propósito principal es contener y corregir la dirección de desplazamiento de los vehículos desviados que utilizan la estructura, por lo que deben estructural y geoméricamente resistir al choque. Brindan además seguridad al tráfico peatonal, ciclista y bienes situados en las carreteras y otras áreas debajo de la estructura. Deben ubicarse como mínimo a 0.60 m del borde de una vía y como máximo a 1.20 m. En puentes de dos vías de tráfico puede disponerse de una barrera como elemento separador entre las vías (AASHTO LRFD, 2017).

G) Pavimento: Puede ser rígido o flexible y se dispone en la superficie superior del puente y accesos. El espesor del pavimento se define en función al tráfico esperado en la vía.

H) Drenaje: La pendiente de drenaje longitudinal debe ser la mayor posible, recomendándose un mínimo de 0.5%. La pendiente de drenaje transversal mínima es de 2% para las superficies de rodadura. En caso de rasante horizontal, se utilizan también sumideros o lloraderos, de diámetro suficiente y número adecuado. El agua drenada no debe caer sobre las partes de la estructura (Serquén, 2016).

2.3. Análisis Estructural

2.3.1. Filosofía de diseño

(MTC, 2018), establece que los puentes deberán ser diseñados teniendo en cuenta los Estados Límite que se especificarán, para cumplir con los objetivos de constructibilidad, seguridad y serviciabilidad, así como con la debida consideración en lo que se refiere a inspección, economía y estética.



2.3.2. Estados Límites

(MTC, 2018), dispone que todas las especificaciones de diseño son escritas para establecer un nivel aceptable de seguridad. El método para tratar asuntos de seguridad en especificaciones modernas es el establecimiento de estados límite para definir grupos de eventos o circunstancias que podrían causar que una estructura sea inservible para su objetivo original.

“Las Especificaciones LRFD están escritas con un formato de Estados Limite basado en probabilidades requiriendo el análisis de algunos, o todos, de los cuatro Estados Límite” (Ramirez Coria, 2010).

Para el estado límite de servicio y el estado límite de evento extremo, los factores de resistencia serán tomados como 1.0 todos los estados límite serán considerados de igual importancia.

$$\sum n_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (1)$$

Para cargas para las cuales un valor máximo de γ_i es apropiado:

$$n_i = n_D n_R n_I \geq 0.95 \quad (2)$$

Para cargas para las cuales un valor mínimo de γ_i es apropiado:

$$n_i = \frac{1}{n_D n_R n_I} \leq 1.0 \quad (3)$$

Donde:

- γ_i = factor de carga: multiplicador de base estadística que se aplica a las solicitaciones
- ϕ = factor de resistencia: multiplicador de base estadística que se aplica a la resistencia nominal.
- n_i = factor de modificación de las cargas: factor relacionado con la ductilidad, redundancia e importancia operativa.
- n_D = factor relacionado con la ductilidad.
- n_R = factor relacionado con la redundancia.
- n_I = factor relacionado con la importancia operativa.
- Q_i = efectos de fuerza (solicitaciones).
- R_n = resistencia nominal.
- R_r = resistencia mayorada



2.3.2.1. Estado Límite de Servicio

Estado límite de servicio, que garantice unas tensiones, deformaciones y ancho de grietas admisibles en todos los elementos bajo condiciones regulares de servicio.

- **Servicio I.** Combinación de cargas que representa la operación normal del puente con un viento de 90 km/h, tomando todas las cargas a sus valores normales.
- **Servicio II.** Combinación de cargas cuya intención es controlar la fluencia de las estructuras de acero y el resbalamiento que provoca la sobrecarga vehicular en las conexiones de resbalamiento crítico.
- **Servicio III.** Combinación de cargas relacionada exclusivamente con la tracción en superestructuras de hormigón pretensado, cuyo objetivo es controlar la fisuración.
- **Servicio IV.** Combinación de cargas relacionada exclusivamente con la tracción en subestructuras de hormigón pretensado, cuyo objetivo es controlar la fisuración (MTC, 2018).

2.3.2.2. Estado Límite de Fatiga y Fractura

Estado límite de fatiga y fractura, que garantice una determinada tenacidad de fractura en el material; asimismo limitar el crecimiento de grietas bajo cargas consecuentes y prevenir la fractura del puente durante su vida de diseño.

- **Fatiga I.** Combinación de cargas de fatiga y fractura que se relacionan con la vida de fatiga infinita por carga inducida. El concepto de vida de fatiga infinita es usado en puentes con volumen de tráfico alto.
- **Fatiga II.** Combinación de cargas de fatiga y fractura que se relacionan con la vida de fatiga finita por carga inducida. El concepto de vida de fatiga finita es usado en puentes con volumen de tráfico bajo (MTC, 2018).

2.3.2.3. Estado Límite de Resistencia

Estado límite de resistencia, que garantice la resistencia y estabilidad local y global de la estructura bajo las combinaciones de carga especificadas.

- **Resistencia I.** Combinación básica de cargas que representa el uso vehicular normal del puente, sin viento.



- **Resistencia II.** Combinación de cargas que representa el uso del puente por parte de vehículos de diseño especiales especificados por el propietario, vehículos de circulación restringida, o ambos, sin viento.
- **Resistencia III.** Combinación de cargas que representa el puente expuesto a vientos de velocidades superiores a 90 km/h.
- **Resistencia IV.** Combinación de cargas que representa relaciones muy elevadas entre las solicitaciones provocadas por las cargas permanentes y las provocadas por las sobrecargas.
- **Resistencia V.** Combinación de cargas que representa el uso del puente por parte de vehículos normales con una velocidad del viento de 90 km/h (MTC, 2018).

2.3.2.4. Estado Límite de Evento Extremo

Estado límite de evento extremo, que garantice la supervivencia estructural del puente tras la actuación del sismo de diseño.

- **Evento extremo I.** Combinación de cargas que incluye sismos.
- **Evento extremo II.** Combinación de cargas que incluye carga de hielo, colisión de embarcaciones y vehículos, y ciertos eventos hidráulicos con una sobrecarga reducida diferente a la que forma parte de la carga de colisión de vehículos, CT (MTC, 2018).

2.3.3. Ductilidad

(MTC, 2018), define que el sistema estructural de un puente será proporcionado y detallado de tal forma que se asegure en los estados límites de resistencia y evento extremo el desarrollo de significantes deformaciones inelásticas visibles antes de la falla.

Valores de n_D para el Estado Límite de Resistencia:

- $n_D \geq 1.05$ (4)

para elementos y conexiones no dúctiles.

- $n_D \geq 0.95$ (5)

para elementos y conexiones para los cuales se han especificado medidas adicionales para mejorar la ductilidad más allá de lo requerido por estas Especificaciones.

- $n_D = 1.00$ (6)



para todos los demás estados límites.

Donde: n_D = factor relacionado con la ductilidad.

2.3.4. Redundancia

(MTC, 2018), define la redundancia como: “La capacidad del sistema estructural de un puente de llevar cargas después de ser dañados o fallados uno o más de sus miembros.”

Para el estado límite de resistencia:

- $n_R \geq 1.05$ (7)

para miembros no redundantes.

- $n_R = 1.00$ (8)

para niveles convencionales de redundancia, elementos de fundación donde ϕ ya cuenta para redundancia.

- $n_R \geq 0.95$ (9)

para niveles excepcionales de redundancia más allá de la continuidad de la viga y sección transversal cerrada a la torsión.

- $n_R = 1.00$ (10)

para los demás estados límite:

Donde: n_R = factor relacionado con la redundancia.

2.3.5. Importancia Operativa

(MTC, 2018), aplica solamente a los Estados Límite de Resistencia y Evento Extremo, para el estado límite de resistencia:

- $n_I = 1.05$ (11)

para puentes críticos o esenciales.

- $n_I = 1.00$ (12)

para puentes típicos.



- $n_I \geq 0.95$ (13)

para puentes de relativa menor importancia.

- $n_I = 1.00$ (14)

Para los demás estados límites:

Donde: n_I = factor relacionado con la importancia operativa.

2.3.6. Determinación de Cargas

2.3.6.1. Cargas Permanentes

Aquellas que actúan durante toda la vida útil de la estructura sin variar significativamente, o que varían en un solo sentido hasta alcanzar un valor límite. Corresponden a este grupo el peso propio de los elementos estructurales y las cargas muertas adicionales tales como las debidas al peso de la superficie de rodadura o al balasto, los rieles y durmientes de ferrocarriles. También se consideran cargas permanentes el empuje de tierra, sobrecarga de tierra, la fricción superficial negativa, entre otros (MTC, 2018).

2.3.6.1.1. Peso Propio (DC)

Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales, actúan durante toda la vida útil del puente.

2.3.6.1.2. Carga Muerta (DW)

Peso propio de todos los elementos no estructurales, tales como veredas, superficies de rodadura, balasto, rieles, durmientes, barandas, postes, tuberías, ductos y cables.

Los elementos estructurales son los que son parte del sistema de resistencia. Los elementos no estructurales unidos se refieren a parapetos, barreras, señales, etc. (MTC, 2018).



Tabla 2. Descripción de los pesos unitarios

Material		Unidad de Peso (kg/m ³)
Aleaciones de aluminio		2800
Superficies de desgaste bituminosas		2200
Hierro fundido		7200
Relleno de ceniza		960
Arena, limo o arcilla compactado		1900
Concreto	Ligero	1760
	Liviano	1920
	Con peso nominal $f'c < 350 \text{ kg/cm}^2$	2320
	Con peso nominal $350 < f'c \leq 1050 \text{ kg/cm}^2$	$2240 + 0.23f'c$
Concreto armado		2400
Arena, limo o grava suelto		1600
Arcilla blanda		1600
Laminados grava, macadam, o de lastre		2240
Acero		7850
Mampostería de piedra		2700
Madera	Dura	960
	Blanda	800
Agua	Dulce	1000
	Salada	1020
Material		Peso por unidad de longitud (kg/m)
Rieles de tránsito, durmientes y fijadores de vía		300

Nota: Esta tabla muestra los pesos específicos de ciertos materiales en unidades de peso (kg/m³), Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.6.2. Cargas Variables

Son aquellas para las que se observan variaciones frecuentes y significativas en términos relativos a su valor medio. Las cargas variables incluyen los pesos de los vehículos y personas, así como los correspondientes efectos dinámicos, las fuerzas de frenado y aceleración, las fuerzas centrífugas, las fuerzas laterales sobre rieles. También corresponden a este grupo las fuerzas aplicadas durante la construcción, las fuerzas debidas a empuje de agua y subpresiones, los efectos de variaciones de temperatura, las acciones de sismo y las acciones de viento (AASHTO LRFD, 2017).

2.3.6.2.1. Cargas Vivas de Vehículos

2.3.6.2.1.1. Número de Vías

En general, el número de carriles de diseño es la parte entera de la relación $w/12.0$ ($w/3.60$ en m), siendo w el ancho libre de calzada entre sardineles, cordones y/o barreras, en ft; (mm).



También se deberían considerar posibles cambios futuros en las características físicas o funcionales del ancho libre de calzada.

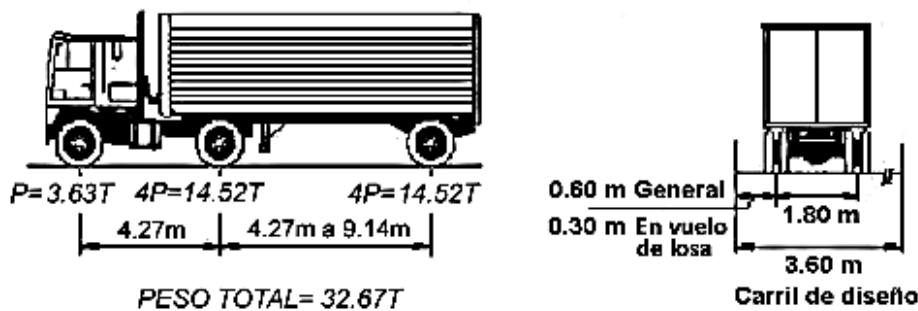
Los anchos de calzada comprendidos entre 20.00 a 24.00 ft (6.00 y 7.20 m) deberán tener dos carriles de diseño, cada uno de ellos de ancho igual a la mitad del ancho de calzada (MTC, 2018).

2.3.6.2.1.2. Diseño con Cargas Vivas Vehiculares (LL)

A. Camión de Diseño

Las cargas por eje del camión de diseño y los espaciamientos entre ejes son los indicados en la **Figura 6**, la distancia entre los ejes más pesados será tomada como aquella que, estando entre los límites de 4.27 m y 9.14 m, resulta en los mayores efectos (MTC, 2018).

Figura 6. Camión de diseño HL-93

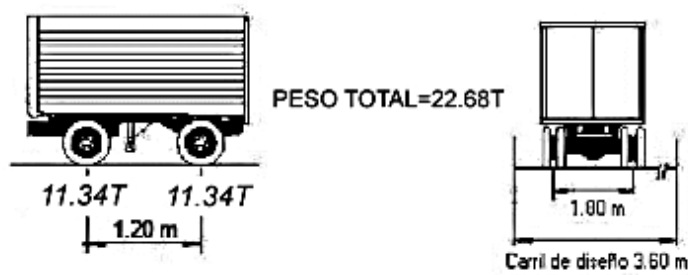


Nota: Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

B. Tándem de Diseño

“El tándem de diseño consistirá en un conjunto de dos ejes, cada uno con una carga de 11.34 Ton, espaciados 1.20 m. La distancia entre las ruedas de cada eje, en dirección transversal, será de 1.80 m” (MTC, 2018).

Figura 7. Tándem de diseño HL-93



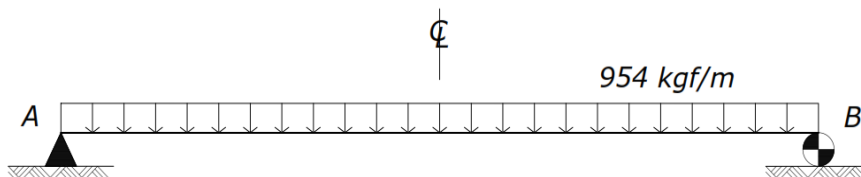
Nota: Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

C. Sobrecarga Distribuida (carga de carril de diseño)

Se considerará una sobrecarga de 954 kg/m, uniformemente distribuida en dirección longitudinal sobre aquellas porciones del puente en las que se produzca un efecto desfavorable. La carga se distribuirá uniformemente sobre un ancho de 3.00 m en dirección transversal.

La sobrecarga vehicular de diseño HL-93 es considerada como una combinación de: Camión de diseño o tándem de diseño + Carga de carril de diseño (MTC, 2018).

Figura 8. Sobrecarga de carril



Nota: Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.6.2.1.3. Presencia Múltiple de Sobrecargas

La sollicitación extrema correspondiente a sobrecarga se deberá determinar considerando cada una de las posibles combinaciones de número de carriles cargados, multiplicando por un factor de presencia múltiple correspondiente para tomar en cuenta la probabilidad de que los carriles estén ocupados simultáneamente por la totalidad de la sobrecarga de diseño HL93. No



es aplicable al estado límite por fatiga. Las cargas peatonales deben ser consideradas como un carril cargado (MTC, 2018).

Tabla 3. Factores de presencia múltiple

Número de Vías cargadas	Factor Presencia múltiple, m
1	1.20
2	1.00
3	0.85
>3	0.65

Nota: Esta tabla muestra los factores de presencia múltiple por número de carriles cargados, Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.6.2.2. Carga Dinámica Permitida (IM)

Los efectos estáticos del camión o tándem de diseño, a excepción de las fuerzas centrífugas y de frenado, se deberán mayorar aplicando los porcentajes indicados en la

Tabla 4. El factor a aplicar a la carga estática se deberá tomar como: $(1 + IM/100)$. El incremento por carga dinámica no se aplicará a las cargas peatonales ni a la carga del carril de diseño (carga uniformemente repartida) (AASHTO LRFD, 2017).

Tabla 4. Incremento de carga por factores dinámicos (IM)

Componente	Porcentaje (IM)
Elementos de unión en el tablero (para todos los estados límite)	75%
Para otros elementos	
- Estados límite de fatiga y fractura	15%
- Otros estados límite	33%

Nota: Esta tabla muestra los factores dinámicos de amplificación por impacto para cargas vehiculares, Adaptado de (*Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018*), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.6.2.3. Fuerzas de Frenado (BR)

La fuerza de frenado se deberá tomar como el mayor de los siguientes valores:

- 25 por ciento de los pesos por eje del camión de diseño o tándem de diseño, o
- 5 por ciento del camión de diseño más la carga del carril o 5 por ciento del tándem de diseño más la carga del carril (AASHTO, 1996).



2.3.6.2.4. Cargas Peatonales sobre Veredas

“Se deberá aplicar una carga peatonal de 367 kg/m² en todas las veredas de más de 0.60 m de ancho, y esta carga se deberá considerar simultáneamente con la sobrecarga vehicular de diseño” (AASHTO, 1996).

2.3.6.2.5. Fuerzas sobre Sardineles

“Los sardineles serán diseñados para resistir una fuerza lateral no menor que 760.00 kg/ml aplicada en el tope del sardinel o a una elevación de 0.25 m. sobre el tablero si el sardinel tuviera mayor altura” (AASHTO, 1996).

2.3.6.2.6. Cargas Sísmicas (EQ)

Los puentes serán diseñados para tener una baja probabilidad de colapso, pero pueden sufrir daños significativos e interrupción del servicio cuando estén sujetos a movimientos sísmicos que tengan siete por ciento de probabilidad de excedencia en 75 años.

Para los puentes de un solo tramo no se requiere análisis sísmico, independientemente de la zona sísmica en la cual estén ubicados. Las conexiones entre la superestructura del puente y los estribos se deberán diseñar para los requisitos mínimos de fuerza especificados (MTC, 2018).

2.3.6.3. Factores de Carga y Combinaciones

La sollicitación mayorada total se tomará como:



Tabla 5. Factores de reducción de resistencia

Los factores de resistencia Ø serán tomados como:	Ø
Para tracción - controlada secciones de concreto reforzado como se define en el Art. 2.7.2.4.2.1 (5.7.2.1 AASHTO)	0.90
Para tracción - controlada secciones de concreto preesforzado como se define en el Art. 2.7.2.4.2.1 (5.7.2.1 AASHTO)	1.00
Para corte y torsión:	
- Concreto de densidad normal	0.90
- Concreto de baja densidad	0.80
Para tracción - controlada secciones con espirales y estribos, como se define en el Art. 2.7.2.4.2.1 (5.7.2.1 AASHTO), excepto como se especifica en el Art. 2.6.5.5.3 y 2.6.5.5.4.1b (5.10.11.3 y 5.10.11.4.1b AASHTO) para zonas sísmicas 2, 3 y 4 en el estado límite de evento extremo.	0.75
Para apoyos sobre concreto	0.70
Para compresión en modelos de bielas y tirantes	0.70
Para compresión en zonas de anclaje:	
- Concreto de densidad normal	0.80
- Concreto de baja densidad	0.65
Para tracción en el acero en zonas de anclaje	1.00
Para resistencia durante el hincado de pilotes	1.00

Nota: Esta tabla muestra los factores de reducción por resistencia por tipos de esfuerzos, Adaptado de (Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.6.3.1. Denominación de las Cargas

(MTC, 2018), establece la siguiente nomenclatura de cargas:

Cargas Permanentes:

- DC = peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales
- DD = fricción negativa (downdrag)
- DW = peso propio de las superficies de rodamiento e instalaciones para servicios
- EH = empuje horizontal del suelo
- EV = presión vertical del peso propio del suelo de relleno
- ES = sobrecarga de suelo

Cargas Transitorias:

- LL = sobrecarga vehicular
- IM = incremento por carga vehicular dinámica
- BR = fuerza de frenado de los vehículos



- PL = sobrecarga peatonal
- LS = sobrecarga de la carga viva
- WA = carga hidráulica y presión del flujo de agua
- WS = viento sobre la estructura
- WL = viento sobre la sobrecarga
- FR = fricción
- TU = temperatura uniforme
- TG = gradiente de temperatura
- EQ = sismo

Tabla 6. Combinación de cargas y factores de cargas

Combinación de Cargas Estado Límite	DC, DW DD,EH EV,ES	LL,IM BR,PL LS,BR	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	EQ
RESISTENCIA I Al menos que se especifique lo contrario	γ_P	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-
RESISTENCIA II	γ_P	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-
RESISTENCIA III	γ_P	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-
RESISTENCIA IV	γ_P	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-
RESISTENCIA V	γ_P	1.35	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-
EVENTO EXTREMO I	1.00	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00
EVENTO EXTREMO II	γ_P	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-
SERVICIO I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-
SERVICIO II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	-	-	-
SERVICIO III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-
SERVICIO IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00	1.00/1.20	-	1.00	-
FATIGA I Solamente LL, IM & CE	-	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-
FATIGA II Solamente LL, IM & CE	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Esta tabla muestra los factores de carga y combinación de cargas por diferentes estados límite, Adaptado de (Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.



Tabla 7. Factores para cargas permanentes

Tipo de Carga, Tipo de Fundaciones, y Métodos Usados para Fuerza de Arrastre Hacia Abajo (Downdrag)	Factor de Carga	
	Máximo	Mínimo
DC: Componentes y Auxiliares.	1.25	0.90
DC: Resistencia IV Solamente.	1.50	0.90
DD: Downdrag Pilotes, a Método de Tominson.	1.40	0.25
Pilotes, a Método	1.05	0.30
Pilotes Perforados, (Drilled Shaft) Método de O Neill and Reese (1999).	1.25	0.35
DW: Superficie de rodadura y accesorios.	1.50	0.65
EH: Presión Horizontal de la Tierra.		
- Activa	1.50	0.90
- En reposo	1.35	0.90
- AEP Para paredes ancladas	1.35	N/A
EL: Esfuerzos residuales acumulados resultantes del proceso constructivo, (Locked-in construction Stresses.)	1.00	1.00
EV: Presión vertical de la tierra		
- Estabilidad global.	1.00	N/A
- Muros y estribos de retención.	1.35	1.00
- Estructura rígida enterrada.	1.30	0.90
- Pórticos rígidos.	1.35	0.90
- Estructuras flexibles enterradas		
▪ Alcantarillas cajón metálica, placas estructurales con corrugaciones y alcantarillas de fibra de vidrio.	1.50	0.90
▪ Alcantarillas termoplásticas.	1.30	0.90
▪ Entre otros.	1.95	0.90
ES: Carga superficial (Sobrecarga) en el terreno	1.50	0.75

Nota: Esta tabla muestra los factores de cargas permanentes en un rango de valores máximos y mínimos para los estados límite de resistencia y evento extremo, Adaptado de (Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.7. Métodos Aproximados de Análisis

Las losas coladas in situ armadas longitudinalmente (losas macizas) pueden tener armadura convencional o armadura pretensada, y se pueden utilizar como puentes tipo losa o como losa superior de una alcantarilla.

Un método aproximado de análisis para tableros, en el cual el tablero se subdivide en franjas perpendiculares a los componentes de apoyo es considerado aceptable para los tableros excepto:

- Los tableros formados por emparrillados con sus vanos total o parcialmente llenos.
- Losa superior de vigas cajón de concreto segmentadas.



Si se utiliza el método de las fajas, el momento extremo positivo de cualquier panel de tablero entre vigas se considerará actuando en todas las regiones de momento positivo. De manera similar, el momento extremo negativo de cualquier viga se considerará actuando en todas las regiones de momento negativo (Bosio Velásquez, 1994)

2.3.7.1. Anchos de Faja Equivalentes para Tableros con Armadura Principal Paralelo al Tráfico

(MTC, 2018), estipula que para puentes losa y losas de concreto de más de 15.0 ft (4.60 m.) de longitud que se extiendan fundamentalmente en la dirección paralela al tráfico, se deberán aplicar los tipos de secciones transversales esquematizados en la Figura 9 y **Figura 10**. Los puentes de losa aligerada concretadas in situ también se pueden considerar como puentes tipo losa.

El ancho equivalente de las fajas longitudinales por carril tanto para corte como para momento con un carril cargado, es decir dos líneas de ruedas, se puede determinar cómo:

$$E = 0.25 + 0.42\sqrt{L_1 * W_1} \quad (15)$$

El ancho equivalente de las fajas longitudinales por carril tanto para corte como para momento con más de un carril cargado se puede determinar cómo:

$$E = 2.1 + 0.12\sqrt{L_1 * W_1} \leq \frac{W}{N_L} \quad (16)$$

Donde:

- E = franja de ancho equivalente (m)
- L1 = longitud de tramo modificada que se toma igual al menor valor entre la longitud real o 18.26 m.
- W1 = ancho modificado entre los bordes del puente, que se toma igual al menor valor entre el ancho real actual o 18.00 m, para carga en múltiples carriles o 9.14 m para carga en un solo carril (m).
- W = ancho físico entre los bordes del puente (m).
- NL = número de carriles de diseño

2.3.7.2. Ancho Equivalente de Franjas Interiores

El ancho de franja equivalente de un tablero puede ser tomado si la dirección principal del tablero es paralela al tráfico, las franjas que soportan una carga de eje no serán más grande que 1.00 m para emparrillados abiertos y para los demás tableros no será más de 3.60 m.

Las franjas equivalentes para tableros cuya dirección principal es perpendicular al tráfico no están sujetas a límites de ancho (Seminario Manrique, 2004).

Figura 9. Ancho de franja equivalente paralelo al tránsito



Nota: Adaptado de Guía para el Diseño de Puentes, (Seminario Manrique, 2004), Repositorio institucional PIRHUA - Universidad de Piura.

2.3.7.3. Ancho de las Franjas Equivalentes en los Bordes de las Losas

Para los fines del diseño, la viga de borde ideal se deberá tomar como una franja de tablero de ancho reducido aquí especificada, más cualquier aumento de altura localizado o protuberancia similar que actúe como rigidizador del tablero. Se asumirá que las vigas de borde soportan una línea de ruedas y, cuando corresponda, una porción tributaria de la carga de carril de diseño (AASHTO LRFD, 2017).

2.3.7.3.1. Bordes Longitudinales

(MTC, 2018), asume que las vigas de borde soportan una línea de ruedas, y donde sea apropiado, una porción tributaria de la carga viva distribuida. Donde el tablero se extiende fundamentalmente en la dirección del tráfico, el ancho efectivo de una franja, con o sin viga de borde, se puede tomar como la sumatoria de la distancia entre el borde del tablero y la cara interna de la barrera, más 12.00 in, más $\frac{1}{4}$ del ancho de franja especificada en los Artículos

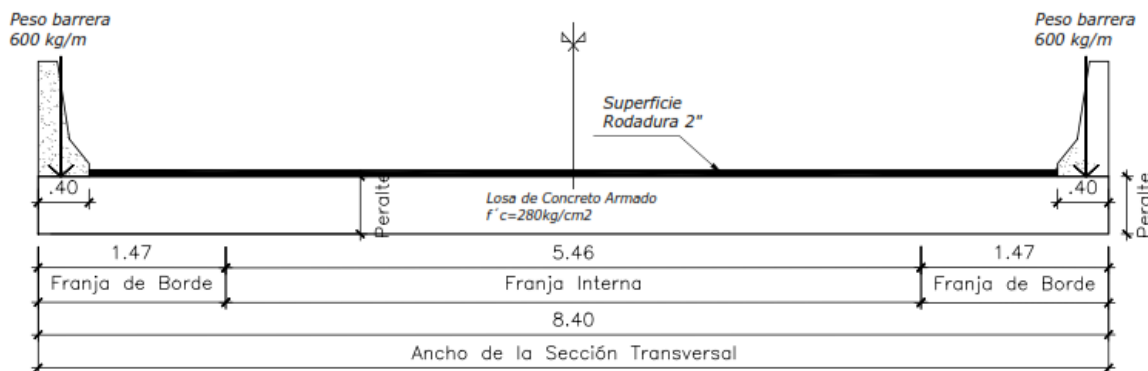
2.6.4.2.1.3, según corresponda, pero no excederá la mitad del ancho total de la franja o 72.00 in (1800 mm).

$$E_{borde} = AnchoBarrera + 30 + \frac{E}{4} \leq \left(\frac{E}{2} \text{ o } 1.80m\right) \quad (17)$$

Donde:

- E = franja de ancho equivalente (m)
- E_{borde} = franja de borde de la sección transversal (m)
- AnchoBarrera = Ancho de la base de la barrera de protección (m).

Figura 10. Disposición de las Franjas equivalentes



Nota: Adaptado de Diseño de Puentes AASHTO (CivilGeeks, 2014), CivilGeeks.com: file:///C:/Users/user/Downloads/Libro-de-Puentes-AASHTO%20(2).pdf

2.3.7.3.2. Bordos Transversales

La viga transversal de borde se asume que soporta un eje del camión de diseño, en uno o más carriles de diseño, ubicados para producir las máximas solicitaciones. Se deberá aplicar los factores de presencia múltiple y de amplificación dinámica.

El ancho efectivo de una franja, con o sin viga de borde, se puede tomar como la sumatoria de la distancia entre el borde transversal del tablero y el eje de la primera línea de apoyo del tablero, generalmente tomada como el alma de una viga, más la mitad del ancho de franja especificado. El ancho efectivo no deberá ser mayor que el ancho de franja total especificado (MTC, 2018).



2.3.8. Líneas de Influencia

2.3.8.1. Introducción

Para proyectar una viga o entramado que ha de soportar la acción de cargas móviles, es necesario determinar de alguna manera la posición de dichas cargas, que dará origen al máximo esfuerzo cortante, o al máximo momento flector en una sección. Téngase muy en cuenta que la posición de cargas que dé origen el máximo esfuerzo cortante en una sección no originará necesariamente el máximo momento flector en esta misma sección, es decir, que el sistema de cargas que de origen al valor máximo del momento flector en una sección puede no originar el máximo momento de flexión en otra sección cualquiera. Cuando se trate de buscar un máximo, ya sea del esfuerzo cortante, del momento de flexión o del esfuerzo en una barra, lo primero hacer es determinar la, posición crítica de las cargas móviles (CivilGeeks, 2014).

2.3.8.2. Definición

“La línea de influencia es una curva cuya “ordenada” muestra la variación del “efecto” causado por una carga unitaria que se mueve a través de la estructura.” Así la ordenada en cualquier punto representa el valor del “efecto” cuando la carga unitaria está actuando en el correspondiente punto de la estructura.

La unidad de las “ordenadas” de una línea de influencia corresponde a la unidad del “efecto” que se cuantifica dividido por la unidad de la fuerza. Así la unidad de la ordenada de la línea de influencia de una fuerza de reacción en un apoyo o de una fuerza de corte en una sección transversal es adimensional (CivilGeeks, 2014).

2.3.8.3. Líneas de Influencia para tramos Estáticamente Determinados

Cualquiera de los siguientes procedimientos puede usarse para construir la línea de influencia en un punto P específico de un miembro para cualquier función (reacción, fuerza cortante o momento). En estos procedimientos escogeremos la fuerza móvil con una magnitud unitaria adimensional.

- Una vez que se ha determinado la línea de influencia se puede conocer la posición de la carga unitaria para la cual el efecto alcanza su valor máximo.
- Si se conoce para cada sección de una viga la línea de influencia de un determinado “efecto”, se puede dibujar la curva envolvente de las líneas de influencia y de ella se



determina la posición de la sección donde debe actuar la carga unitaria para producir el valor máximo del efecto.

- Si las ordenadas resultan de un mismo signo, para todas las posiciones de la carga unitaria móvil, el “efecto” tiene el mismo signo.
- Las líneas de influencia en una estructura isostática son líneas rectas. De este modo la construcción de las líneas de influencia se reduce a determinar las ordenadas de unos pocos puntos de ellas.
- Cuando la carga móvil que actúa sobre la estructura es una carga concentrada de magnitud P , la magnitud del “efecto” debido a esta carga es igual al producto de la carga P por la ordenada de la línea de influencia para el “efecto” considerado en el punto donde se ubica la carga P .
- Para obtener el máximo valor del efecto, la carga P debe ubicarse en la posición para la cual la ordenada de la línea de influencia es máxima (Chile, 2012).

2.3.8.4. Propiedades por Tipo de Cargas

2.3.8.4.1. Cargas Concentradas

El valor de una respuesta (reacción, esfuerzo o deformación) debido a una carga aislada, es igual al producto de la magnitud de la carga por la ordenada de la línea de influencia de esa respuesta, medida en el punto de aplicación de la carga (Chile, 2012).

2.3.8.4.2. Tren de Cargas Puntuales

Para calcular el valor de la respuesta (reacción, esfuerzo de sección) debida a un tren de cargas puntuales P , se calcula en primer lugar la línea de influencia de esa respuesta, a la que se denomina línea de influencia básica. A continuación, se suma el valor que tiene la línea de influencia básica en la posición de cada carga, multiplicada por el calor de la carga correspondiente con su signo (Chile, 2012).

2.3.8.5. Construcción de Líneas de Influencia Isostáticas

2.3.8.5.1. Líneas de Influencia de las Reacciones en una viga

(Saila, 2019), establece que veamos la manera de construir las líneas de influencia de las reacciones en los apoyos derecho o izquierdo de una viga simplemente apoyada AB que se representa en la **Figura II**. Se coloca la carga unidad a una distancia x del apoyo A de la izquierda. Tomando momentos respecto al punto B , la reacción en el apoyo izquierdo será:

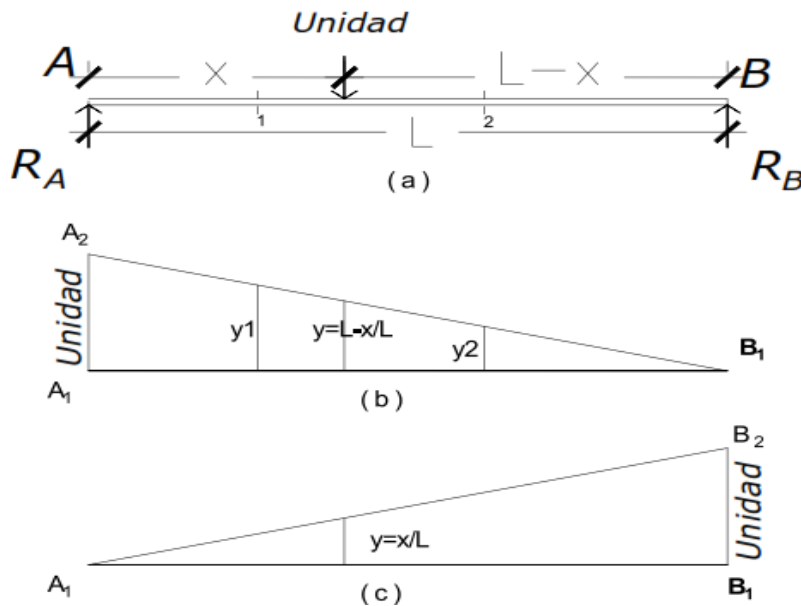


$$R_A = \frac{L - x}{L} \quad (18)$$

y tomando momentos respecto al punto A, la reacción en el apoyo derecho será:

$$R_B = \frac{x}{L}; \quad (19)$$

Figura 11. Líneas de influencia de reacciones en una viga



Nota: Ala figura muestra líneas de influencia de las reacciones (a) tanto para la izquierda (b) y derecha (c) en una viga isostática, adaptado de Diseño de Puentes AASHTO (CivilGeeks, 2014), CivilGeeks.com: file:///C:/Users/user/Downloads/Libro-de-Puentes-AASHTO%20(2).pdf

2.3.8.5.2. Líneas de Influencia del Esfuerzo Cortante en una Viga

(Vallecilla B., 2008), estipula que vamos a construir la línea de influencia para el esfuerzo cortante en la sección C de la viga AB representada en la **Figura 12**. Para una carga unidad situada a una distancia x de A, si $x < a$, el esfuerzo cortante en C será:

$$V_C = R_A - 1; \quad (20)$$

$$V_C = \frac{L-x}{L} - 1 = -\frac{x}{L}; \quad (21)$$

La ordenada de la línea de influencia del esfuerzo cortante en C es:

$$V_C = -\frac{a}{L}; \quad (22)$$

Obsérvese que, para esta condición de carga ($x < a$), el esfuerzo cortante en C es igual en valor absoluto, a la reacción del apoyo derecho R_B . Por consiguiente, puede tomarse como la línea de influencia del esfuerzo cortante en C, a la parte de la línea de influencia de la reacción en el apoyo derecho comprendida entre A y C; sin embargo, para ponerla de acuerdo con el convenio adoptado de signos, esta línea A_1C_2 se ha trazado con ordenadas negativas.

Si $x > a$, el esfuerzo cortante en C es la reacción en el apoyo izquierdo

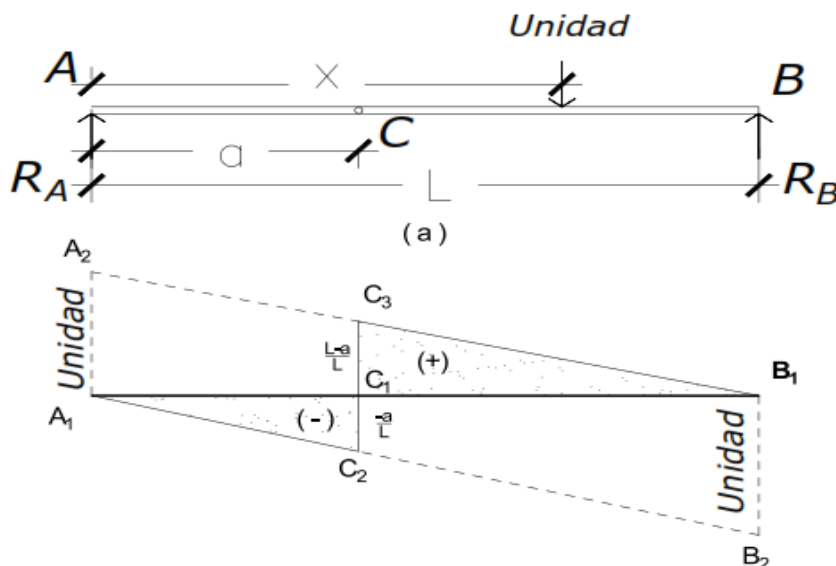
$$V_C = R_A \quad (23)$$

$$V_C = \frac{L - x}{L} \quad (24)$$

Así para la parte de la viga comprendida entre C y B, tenemos que la línea de influencia del esfuerzo cortante es la misma que la de la reacción en el apoyo izquierdo R_A . La ordenada de la línea de influencia del esfuerzo cortante en C es:

$$V_C = \frac{L - a}{L}; \quad (25)$$

Figura 12. Líneas de influencia del esfuerzo cortante en una viga



Nota: Ala figura muestra líneas de influencia por esfuerzo cortante en una viga isostática, adaptado de Diseño de Puentes AASHTO (CivilGeeks, 2014), CivilGeeks.com: file:///C:/Users/user/Downloads/Libro-de-Puentes-AASHTO%20(2).pdf

El diagrama $A_1C_2C_3, B_1$ es la línea de influencia del esfuerzo cortante en la sección C. Se observará que la ordenada C_1C_3 es el esfuerzo cortante positivo en C cuando la carga unidad



está aplicada a una distancia infinitamente pequeña a la derecha de C. y la ordenada C_1C_2 , es el esfuerzo cortante negativo en C cuando la carga unidad está aplicada a una distancia infinitamente pequeña a la izquierda de C (Vallecilla B., 2008).

2.3.8.5.3. Líneas de Influencia del Momento Flector en una Viga

(Vallecilla B., 2008), establece que la línea de influencia para el momento de flexión en la sección C de la viga AB, es indicada con todo detalle en la **Figura 13**. Para una carga unidad situada a una distancia x de A, las reacciones están dadas por las ecuaciones 18 y 19; si $x < a$, el momento de flexión en C, considerando AC como cuerpo libre, es:

$$M_C = (R_A * a) - 1 * (a - x) = \frac{x}{L} * (L - a) \quad (26)$$

La misma expresión puede obtenerse considerando CB como cuerpo libre. Así,

$$M_C = R_B * (L - a) = \frac{x}{L} * (L - a) \quad (27)$$

Esta es la ecuación de la recta A_1C_2 , obsérvese que: $M_C=0$ cuando la carga unidad está en $x=0$ y

$$M_C = \frac{a}{L} * (L - a) \quad (28)$$

cuando la carga unidad está en $x=a$. Si $x > a$, considerando AC como cuerpo libre,

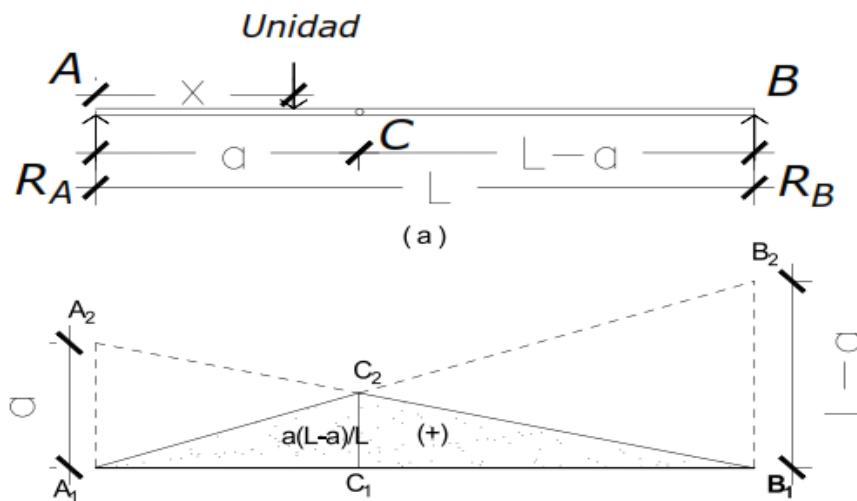
$$M_C = R_A * a = \frac{a}{L} * (L - x) \quad (29)$$

O bien considerando CB como cuerpo libre

$$M_C = R_B * (L - a) - 1 * (x - a); \quad (30)$$

$$M_C = \frac{x}{L} * (L - a) - 1 * (x - a) = \frac{a}{L} * (L - x) \quad (31)$$

Figura 13. Líneas de influencia del momento flector en una viga



Nota: Ala figura muestra líneas de influencia por esfuerzo del momento flector en una viga isostática, adaptado de Diseño de Puentes AASHTO (CivilGeeks, 2014), CivilGeeks.com: file:///C:/Users/user/Downloads/Libro-de-Puentes-AASHTO%20(2).pdf

esta es la ecuación de la recta C_2B_1 , obsérvese en la ecuación 31 cuando $x=a$ y $M_c=0$ cuando $x=L$, las rectas A_1C_2 y B_1C_2 tienen una ordenada común en C.

Resulta que la línea de influencia del momento de flexión en C de la viga simplemente apoyada AB coincide con el diagrama del momento de flexión producido por una carga unidad aplicada en C. Sin embargo, la interpretación de estos dos diagramas es completamente diferente; es decir que las ordenadas correspondientes a la línea de influencia dan el momento de flexión en C cuando la carga unidad se va moviendo a lo largo del vano, mientras que el diagrama del momento de flexión representa los momentos de flexión en las distintas secciones debidos a una carga unidad fija situada en C (CivilGeeks, 2014).

2.3.9. Peraltes y Recubrimientos

(MTC, 2018), en el Art. 2.9.1.4.6.1.1. define que el peralte mínimo de un tablero excluyendo ranuras o desgastes no deberá ser menor que 7.0 in (175mm). El mínimo espesor de los tableros de concreto en voladizo se tomará lo siguiente:

- Cuando soportan un sistema de postes montados en el tablero: 0.20m.
- Para sistemas de postes montados lateralmente: 0.30m.
- Cuando soportan parapetos o barreras de concreto: 0.20m.



Tabla 8. Peraltes mínimos para superestructuras de profundidades constantes

Superestructura		Profundidad mínima (incluyendo al tablero)	
		Si se utilizan elementos de profundidad variable, estos valores se pueden ajustar para considerar los cambios de rigidez relativa de las secciones de momento positivo y negativo.	
Material	Tipo	Tramos Simples	Tramos Continuos
Concreto reforzado	Losa con armadura principal paralela al tráfico	$\frac{1.2(S+10)}{30}$ (en ft)	$\frac{(S+10)}{30} \geq 0.54$ (ft)
	Vigas T	0.070L	0.065L
	Vigas Cajón	0.060L	0.055L
	Vigas de estructuras peatonales	0.035L	0.033L

Nota: Esta tabla muestra fórmulas en función de la luz para el cálculo de peraltes mínimos en tableros de superestructuras constantes de concreto armado, adaptado de (Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

Tabla 9. Recubrimientos para las armaduras principales de acero no protegidas

SITUACIÓN	RECUBRIMIENTO (mm)
Exposición directa al agua salada	100
Vaciado del concreto contra el suelo	75
Ubicaciones costeras	75
Exposición de sales anticongelantes	60
Superficies de tableros con tránsito de neumáticos con clavos o cadenas	60
Situación exterior que no sea superior	50
Otras situaciones interiores	
▪ Hasta barras N°36	40
▪ Barras N°43 y N°57	50
Parte inferior de las losas de concreto vaciado in-situ	
▪ Hasta barras N°36	25
▪ Barras N°43 y N°57	50
Paneles prefabricados encofrados y encajonados	20

Nota: Esta tabla muestra los recubrimientos para el acero de refuerzo recomendados por tipo de situación, adaptado de (Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018), Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección general de Caminos y Ferrocarriles.

2.3.9.1. Superestructura Tipo Losa de Concreto Armado

Los puentes de concreto armado tipo losa de un tramo resultan económicos en tramos cortos, cuando las luces no exceden 12m.

Los puentes tipo losa cuando son continuos con tramos extremos de hasta 10.5m, son mejor proporcionados cuando la relación de tramo interior a tramo exterior es 1.26 para cargas y esfuerzos usuales; cuando el tramo exterior va de 10.5m a 15m, la relación adecuada es 1.31.



En general las longitudes de los tramos extremos se proyectan aproximadamente como el 80% de la longitud del tramo interior para balancear los momentos (Serquén, 2016).

Tabla 10. Longitudes máximas de tramo para puentes losa

Número de Tramos	Sin cartelas	Acartelados
1	9.00 m	12.00 m
2	12.00 m	15.00 m
3 o 4	15.00 m	18.00 m

Nota: Esta tabla muestra las longitudes máximas por tramo acarteladas y sin acartelar para puentes tipo losa de concreto armado, adaptado de Puentes con AASHTO LRFD (Serquén, 2016), MSc. Ing. Arturo Rodríguez Serquén.

Tabla 11. Luces de puentes de concreto construidos

Simplemente apoyados	Luz (m)
Losa	6.00 – 12.00
Vigas T	12.00 – 24.00
Placa sólida en arco	12.00
Vigas curvas en arco	18.00

Nota: Esta tabla muestra las longitudes de puentes isostáticos construidos de concreto armado, adaptado de Puentes con AASHTO LRFD (Serquén, 2016), MSc. Ing. Arturo Rodríguez Serquén.

2.4. Diseño Estructural

2.4.1. Diseño por Corte

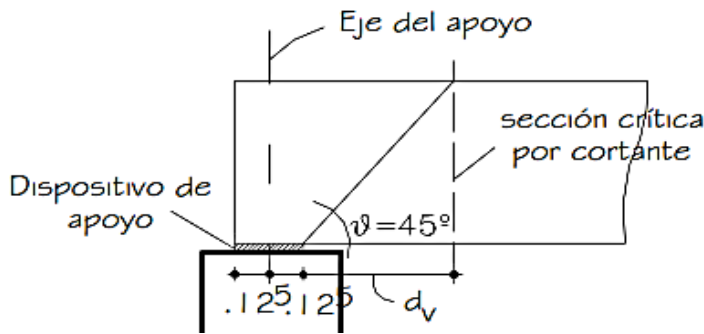
2.4.1.1. Sección Crítica por Corte cerca al Apoyo Extremo

(MTC, 2018), establece que, para determinar la resistencia al corte de las losas y zapatas en la proximidad de cargas o reacciones concentradas, la más crítica de las siguientes condiciones será determinante:

- Comportamiento en una dirección, con una sección crítica que se extiende en un plano que atraviesa todo el ancho y ubicado a una distancia que se especifica en el Artículo 2.9.1.5.6.3.2 (5.8.3.2 AASHTO).

De acuerdo al Art. 5.8.3.2, cuando la reacción en dirección del cortante aplicado introduce compresión en la región extrema, la sección crítica por corte se localiza a una distancia d_v desde la cara interna del apoyo tal como muestra la **Figura 14**.

Figura 14. Sección crítica por cortante



Nota: Adaptado de Puentes con AASHTO LRFD (Serquén, 2016), MSc. Ing. Arturo Rodríguez Serquén.

2.4.1.2. Determinación del Peralte Efectivo por Corte

(AASHTO LRFD, 2017), define que cuando la fuerza de reacción en la dirección del corte aplicado introduce compresión en la región extrema de un elemento, la ubicación de la sección crítica para corte se deberá tomar a una distancia igual a d_v partir de la cara interna del apoyo.

Caso contrario, la sección de diseño se deberá tomar en la cara interna del apoyo. Si un elemento tipo viga se extiende a ambos lados del área de reacción, la sección de diseño a cada lado de la reacción se deberá determinar en forma separada en base a las cargas a cada lado de la reacción y considerando si su respectiva contribución a la reacción total introduce tracción o compresión en la región extrema. Para las vigas no pretensadas soportadas por apoyos que introducen compresión en el elemento, sólo se puede proveer armadura transversal mínima entre el borde interior de la placa de apoyo y el extremo de la viga.

El peralte de corte efectivo d_v no será menor que el mayor valor de las ecuaciones 33 y 34.

$$d_v = d_e + \frac{a}{2} \quad (32)$$

$$(0.90 * d_e) \quad (33)$$

$$(0.72 * h) \quad (34)$$

La sección crítica por corte se ubica desde el eje del apoyo a:

$$\frac{\text{Ancho de apoyo}}{2} + d_v \quad (35)$$



2.4.1.3. Determinación de Fuerzas Cortantes por Cargas DC, DW y LL

Determinación de las fuerzas cortantes por carga muerta de la losa y barrera (V_{DC} y $V_{DCbarrera}$), fuerza cortante por carga de rodadura (V_{DW}) y fuerza cortante por carga viva de camión ($V_{LL-CAMION}$), tandem ($V_{LL-TANDEM}$) y carril ($V_{DC-CARRIL}$) (Serquén, 2016).

2.4.1.3.1. Fuerza Cortante Última Interna y Externa

La fuerza cortante ultima para el diseño por estado límite de resistencia I, considera la siguiente combinación de cargas para fuerzas cortantes internas y de borde (externas).

$$Vu_{int} = 1.25 * V_{DC} + 0.50 * V_{DW} + 1.75 * \frac{V_{LLc} + 1.33 * \max(V_{LLt}, V_{LLc})}{E} \quad (36)$$

$$Vu_{ext} = 1.25V_{DC} + 1.25 * \frac{V_{DCBarr}}{E} + 1.50V_{DW} * \frac{E - A_{Barr}}{E} + 1.75 * \frac{V_{LLc} * (E - A_{Barr})}{E} + 0.5 * 1.33 * \frac{\max(V_{LLt}, V_{LLca})}{E} \quad (37)$$

Donde:

- E = Ancho de franja crítica interna o externa (m)
- V_{DC} = Fuerza cortante por carga muerta (Tnf)
- V_{DW} = Fuerza cortante por superficie de rodadura (Tnf)
- V_{LLc} = Fuerza cortante por peso de la barrera (Tnf)
- V_{LLt} = Fuerza cortante por carga tándem (Tnf)
- V_{LLca} = Fuerza cortante por carga de camión (Tnf)
- V_{DCBarr} = Fuerza cortante por peso de la barrera (Tnf)
- A_{Barr} = Ancho de barrera de protección (m)
- Vu = Fuerza cortante Última (interna o externa), estado límite de resistencia (Tnf)

2.4.1.4. Diseño de Estribos en Sección Crítica

(Serquén, 2016), estipula que el diseño de las secciones transversales de los elementos sujetos a fuerza cortante o cortante actuante deberá basarse en la expresión:

$$Vr = \phi Vn \geq Vu \quad (38)$$

Donde:

- Vr = fuerza cortante ultima resistente de la sección analizada (Tnf).
- Vu = fuerza cortante ultima actuante de la sección analizada (Tnf).
- Vn = es la resistencia nominal al corte de la sección analizada (Tnf).



- \emptyset = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 2.7.1.1.4.2. Manual de puentes 2018)

2.4.1.5. Resistencia Nominal al Corte

(MTC, 2018), estipula que la resistencia nominal V_n estará conformada por la contribución del concreto V_c , por la contribución del acero V_s y V_p (componente de la fuerza de pretensado efectiva en la dirección del corte aplicado), de tal forma que se deberá determinar como el menor valor de:

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (39)$$

$$V_n = 0.25 * f'_c * b * d_v + V_p \quad (40)$$

Considerando $V_s=0$ y $V_p=0$ (para puentes tipo losa no se tomará en cuenta), ahora se tendrá que:

$$V_n = V_c \quad (41)$$

$$V_n = 0.25 * f'_c * b * d_v \quad (42)$$

2.4.1.5.1. Cortante Nominal Resistente del Concreto

La contribución del concreto V_c podrá evaluarse para miembros sujetos únicamente a corte y flexión.

$$V_c = 0.53 * \sqrt{f'_c} * b * d_v \quad (43)$$

Donde:

- V_c = cortante nominal resistente del concreto (kg)
- f'_c = resistencia a compresión del concreto (kg/cm²)
- b = Ancho de análisis, se opta el valor de 100 cm.
- d_v = Peralte efectivo de corte (cm)

2.4.2. Diseño por Flexión

2.4.2.1. Determinación de Momentos Flectores por Cargas DC, DW y LL

Determinación de los momentos flectores por carga muerta de la losa y barrera (M_{DC} y $M_{DCbarrera}$), momentos flectores por carga de rodadura (M_{DW}) y momentos flectores por carga



viva de camión ($M_{LL-CAMION}$), tandem ($M_{LL-TANDEM}$) y carril ($M_{DC-CARRIL}$). Para la determinación de los momentos flectores para cargas vivas se utilizará líneas de influencia explicado en el ítem 2.3.8 (Serquén, 2016).

2.4.2.1.1. Momento Flector Último Interno y Externo

(MTC, 2018), especifica que el momento flector último para el diseño considera la combinación de cargas intervinientes en la losa, tanto para la franja interna y de borde, mayoradas por la combinación de factores de cargas (ver **Tabla 6**) para el estado límite de resistencia I.

Para puentes losa y losas de concreto de más de 4.6 m ($Luz > 4.6$ m), los anchos de franjas “E” para cargas vivas es aplicable el Art. 4.6.2.1.2 del manual de puentes del MTC. Cuyos momentos por cargas vivas se distribuyen en franjas equivalentes del ancho transversal del puente, a continuación, se muestra los momentos flectores últimos de diseño mayorados por el estado límite de resistencia I.

$$MuResist_{int} = n * (1.25M_{DCint} + 1.50M_{DWint} + 1.75 \frac{M_{LLint}}{E_{int}}) \quad (44)$$

$$MuResist_{ext} = n(1.25M_{DCext} + 1.50M_{DWext} + 1.75 \frac{M_{LLext}}{E_{ext}}) \quad (45)$$

Donde:

- $MuResist$ = Momento flector último interno y externo, estado límite de resistencia I (Tnf -m)
- M_{DC} = Momento flector por carga muerta interna y externa (Tnf -m)
- M_{DW} = Momento flector por carga de superficie rodadura interna y externa (Tnf -m)
- M_{LL} = Momento flector por carga viva interna y externa más 33% impacto (Tnf -m)
- E_{int} = Ancho de franja interno crítico, mínimo valor entre “E1” y “E2” (m)

Para la determinación del ancho de franja para bordes longitudinales según el (Art. 4.6.2.1.4b), el ancho efectivo E_{borde} en bordes longitudinales se toma como la sumatoria de la diferencia entre el borde del tablero y la cara interna de la barrera, mas 0.30 m, mas $\frac{1}{4}$ del ancho de faja $E_{interna}$, especificados en el ítem 2.3.7.1; además E_{borde} no excederá la mitad del ancho total de la franja ($E/2$) o 1.80m.



2.4.3. Diseño del Acero de Refuerzo

2.4.3.1. Acero Mínimo

(MTC, 2018), de acuerdo a su Art. 2.9.1.4.4.2. sostiene que en cualquier sección de un elemento flexionado la cantidad de armadura de tracción pretensada y no pretensada deberá ser adecuada para desarrollar una resistencia a la flexión factorada o amplificada, como mínimo igual al menor valor entre: 1.33 veces el momento mayorado (M_u) requerido por las combinaciones de cargas para los estados límites de resistencia y M_{cr} .

$$M_u > \text{minimo}(M_{cr}, 1.33 * M_u) \quad (46)$$

$$M_{cr} = 1.1 * f_r * S_c \quad (47)$$

$$f_r = 2.01 * \sqrt{f_c} \quad (48)$$

$$S_c = \frac{B * t_{min}^2}{6} \quad (49)$$

Donde:

- M_u = Momento flector último (Tnf -m), evaluado bajo condición de acero mínimo
- M_{cr} = Momento por resistencia a flexión factorada o amplificada (kg-m)
- f_r = Módulo de ruptura del concreto (kg/cm²)
- S_c = Módulo de sección para la fibra extrema de la sección compuesta donde el esfuerzo de tensión es causado por cargas aplicadas externamente (cm³).
- f_c = Resistencia a la compresión del Concreto (kg/cm²)
- B = Ancho de franja interior referencial (m)
- t_{min} = Peralte mínimo de predimensionamiento (cm)

2.4.3.2. Acero Principal Paralelo al Tráfico

(Serquén, 2016), sostiene que el acero de refuerzo colocado en dirección paralela al tráfico, se diseña con el momento flector positivo máximo, cuya ubicación será en la parte inferior de la losa (tablero). La separación de los refuerzos principales esta dado por la relación “Área acero asumido/ A_s calculado” (m).

$$A_s = \frac{M_u}{0.9 * f_y * (d - \frac{a}{2})} \quad (50)$$



$$a = \frac{As}{0.85 * f_c * B} \quad (51)$$

$$d = t_{\min} - \left(r + \frac{\phi}{2} \right) \quad (52)$$

Donde:

- As = Área del acero principal interior paralelo al tráfico (cm^2)
- Mu = Momento flector último interno y externo, estado límite de resistencia I (Tnf -m)
- f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (kg/cm^2)
- d = Peralte efectivo (cm)
- a = Altura del diagrama de tensiones equivalente interno (cm)
- r = Recubrimiento principal (cm)
- ϕ = Diámetro asumido del acero de refuerzo principal (cm)

2.4.3.3. Acero de Distribución

(MTC, 2018), sustenta que el acero de distribución o armadura secundaria perpendicular al tráfico, es el acero que se coloca en la parte inferior de las losas y se deberá disponer dicha armadura en la dirección secundaria; esta armadura se deberá calcular como un porcentaje de la armadura principal para momento positivo:

$$As_{Dist} = \frac{P\% * As}{100} \quad (53)$$

$$P\% = \frac{55}{\sqrt{LuzPuede}} \leq 50\% \quad (54)$$

Donde:

- As_{Dist} = Área del acero de distribución (cm^2)
- $P\%$ = Porcentaje que representa el acero de distribución respecto al principal
- As = Área del acero principal paralelo al tráfico (cm^2)
- $LuzPuede$ = Longitud del puente entre ejes (m)

La separación de los refuerzos secundarios esta dado por la relación “Área acero asumido/As calculado (m)”.

2.4.3.4. Acero de Temperatura

(MTC, 2018), confiere que el acero de temperatura o Refuerzos por Temperatura y Acortamiento de fragua se coloca, por no contar con ningún tipo de acero, en la parte superior de la losa, en ambos sentidos y en las partes laterales.



Los refuerzos por temperatura y acortamiento de fragua serán colocados cerca de las caras del concreto expuesto a cambios diarios de temperatura y en la masa estructural de concreto. El refuerzo por temperatura y acortamiento de fragua es un refuerzo adicional por lo cual el refuerzo total sobre las superficies no debe ser menor del que se especifica aquí.

El reforzamiento por temperatura y acortamiento de fragua puede ser en forma de barras, alambres soldados o tendones preesforzados. Para barras o alambres soldados, en cada cara y en cada dirección deberá satisfacer:

$$2.33 \left(\frac{cm^2}{m} \right) \leq AsTemp \left(\frac{cm^2}{m} \right) \leq 12.70 \left(\frac{cm^2}{m} \right) \quad (55)$$

$$AsTemp = \frac{0.18 * AT * tmin}{2 * (AT + tmin)} \quad (56)$$

Donde:

- AsTemp = Área del acero de temperatura (cm²/m)
- AT = Ancho total de la sección transversal, incluye calzada y barreras (cm)

2.4.4. Revisión por Fisuración o Estado Límite de Servicio

2.4.4.1. Fisuración por Distribución de Armadura

(MTC, 2018), establece en el Art. 2.9.1.4.4.3 que se tiene que hacer una revisión para el acero principal positivo, en dirección del tráfico vehicular, por estado límite de servicio, mediante la armadura de distribución.

2.4.4.1.1. Momento Actuante por Estado Límite de Servicio

Se utilizará la sección agrietada o ancho tributario interno y externo, para el diseño por estado límite de servicio I, con $n = n_D n_R n_I = 1$.

$$Ms = n * \left(M_{DC} + M_{DW} + \frac{M_{LL}}{E} \right) * Ancho_{Trib} \quad (57)$$

$$Ancho_{Trib} = \frac{a_s}{As} \quad (58)$$

$$a_s = \frac{\pi * \phi^2}{4} \quad (59)$$

Donde:

- Ms = Momento flector actuante interno para un ancho tributario interno (Tnf -m)
- M_{DC} = Momento flector interno y externo por carga muerta (Tnf -m)



- M_{DW} = Momento flector interno y externo por carga de superficie rodadura (Tnf -m)
- M_{LL} = Momento flector interno y externo por carga viva más 33% impacto (Tnf -m)
- E = Ancho de franja interno o externo crítico, mínimo valor entre “E1” y “E2” (m)
- $Ancho_{Trib}$ = Ancho tributario interno para una varilla de acero principal (m)
- a_s = Área del acero principal, con el diámetro asumido (cm^2)
- A_s = Área del acero principal interno o externo paralelo al tráfico (cm^2)
- \emptyset = Diámetro asumido del acero de refuerzo principal (cm)
- n = factor de amplificación por estado límite de servicio

2.4.4.1.2. Ubicación del Eje Neutro (E.N)

$$Ancho_{Trib} * y * \left(\frac{y}{2}\right) = Ast * a_s * (d - y) \quad (60)$$

$$Ast = n * a_s = \frac{Es}{Ec} * a_s \quad (61)$$

$$Ec = 15300 * \sqrt{fc} \quad (62)$$

Donde:

- y = Profundidad de la fibra superior en compresión con respecto al E.N (cm)
- Ast = Área de acero trasformada (cm^2)
- d = Peralte efectivo (cm)
- n = Relación modular, que tan rígido es el acero respecto al concreto
- Es = Módulo de elasticidad del acero, 2 040 000 kg/cm², el módulo de elasticidad de acuerdo al R.N.E 0.60 es de 2 000 000 kg/cm²
- Ec = Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm²), el módulo de elasticidad de acuerdo al R.N.E 0.60 es de $Ec = 15000 * \sqrt{fc}$
- fc = Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm²)

2.4.4.1.3. Esfuerzo del Acero bajo Cargas de Servicio

$$f_{SS} = \frac{Ms * 10^5}{j_d * a_s} \quad (63)$$

$$j_d = d - \frac{y}{3} \quad (64)$$

Donde:

- f_{SS} = Esfuerzo de tensión en el acero de refuerzo en el estado límite de servicio (kg/cm²)



- M_s = Momento flector actuante interno y externo por servicio, para un ancho tributario interno y externo (Tnf -m)
- j_d = Distancia del brazo entre las cargas (cm)

2.4.4.1.4. Separación Máxima de la Armadura

El espaciamiento del acero de refuerzo principal en la capa cercana a la cara de tensión deberá cumplir con lo siguiente:

$$S_{max} = \left(\frac{125000 * \gamma_e}{\beta_s * f_{ss}} \right) - 2 * (t_{min} - d) > Ancho_{Trib} \quad (65)$$

$$\beta_s = 1 + \left(\frac{t_{min} - d}{0.7 * d} \right) \quad (66)$$

Donde:

- S_{max} = Separación máxima de la armadura (cm)
- B_s = Condición de separación máxima de la armadura (adim)
- γ_e = factor de encaramiento, 1.00 condición de exposición clase 01, 0.75 Condición de exposición clase 02.
- t_{min} = Peralte mínimo de predimensionamiento (cm)

Condición de exposición Clase 1 se aplica cuando las fisuras pueden ser toleradas debido a la reducida importancia de apariencia y/o corrosión Condición de exposición Clase 2 se aplica al diseño transversal de vigas cajón de concreto segmentadas para cualquier carga aplicada antes de alcanzar la resistencia nominal del concreto y cuando hay incremento de la importancia de apariencia y/o corrosión.

2.4.5. Revisión por Fatiga o Estado Límite de Fatiga

2.4.5.1. Fatiga en la Armadura Principal

2.4.5.1.1. Carga de Fatiga

(MTC, 2018), establece en el Art. 2.4.3.2.4 que la revisión por fatiga se calcula con un camión de diseño ocupando una sola vía, con una separación de 9.14 m entre los ejes posteriores, y una carga de 14.52 Ton. Según el Art. 2.4.3.2.2.6 (MTC, 2018), para el cálculo por estado límite de fatiga no se aplica el factor de presencia múltiple; se considera un factor de impacto del 15% (ver

Tabla 4). Para el diseño por fatiga I, se considera factores de modificación de las cargas con valores de $n = n_{DN} n_{FI} = 1$.



$$M_{fat} = \frac{n*(1.5*M_{LLIM})}{E} \quad (67)$$

$$M_{LLIM} = \left(\frac{P*L}{4}\right) * 1.15 \quad (68)$$

Donde:

- M_{fat} = Momento por combinación de carga viva por fatiga (Tnf -m)
- M_{LLIM} = Momento por carga viva para fatiga, considerando impacto (Tnf -m)
- E = Ancho efectivo para una sola vía cargada (m)
- P = Carga puntual del camión de diseño (Tnf)
- L = Luz del puente (m)

El camión se ubicará, tanto en dirección longitudinal como en la dirección transversal, en las posiciones que produzcan los efectos máximo y mínimo para el elemento en estudio, de modo tal que se obtenga el máximo rango de esfuerzos.

La frecuencia de la carga de fatiga se calculará sobre la base del tráfico de vehículos de tres o más ejes en cada dirección. Para estos cálculos deberá considerarse el volumen de tráfico promedio a lo largo de la vida útil del puente.

2.4.5.1.2. Sección Fisurada por Estado Limite de Fatiga

(MTC, 2018), establece en el Art. 2.7.1.1.3 utilizar la sección fisurada, del estado límite de resistencia, si la suma de esfuerzos debido a cargas permanentes no mayoradas más la combinación de carga de Fatiga I, da por resultado una tensión de tracción mayor.

$$F_{fat} = \frac{M'_{fat}}{S_c} > F_{tracc} = 0.80 * \sqrt{f_c} \quad (69)$$

Esfuerzo debido a cargas permanentes no mayoradas más la combinación de carga de fatiga I en una franja interior.

$$M'_{fat} = M_{DCint} + M_{DWint} + M_{fat} \quad (70)$$

Donde:

- F_{fat} = Sección fisurada o agrietada (kg/cm²)
- F_{tracc} = Tensión de tracción no mayoradas del concreto (kg/cm²)
- F_c = Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm²)
- M'_{fat} = Momento por cargas permanentes no mayoradas más la combinación de carga viva por fatiga (Tnf -m)



- Sc = Módulo de sección para la fibra extrema de la sección compuesta donde el esfuerzo de tensión es causado por cargas aplicadas externamente (cm³).
- M_{DCint} = Momento flector interno por carga muerta (Tnf -m)
- M_{DWint} = Momento flector interno por carga de superficie de rodadura (Tnf -m)
- M_{fat} = Momento por combinación de carga viva por fatiga (Tnf -m)

2.4.5.1.3. Verificación de Esfuerzos - Franja Interior

2.4.5.1.3.1.Esfuerzo en el Refuerzo Debido a la Carga Viva

$$F_{LL} = \frac{M_{fat}}{AS_{int} * j_d} \quad (71)$$

$$AS_{int} = \frac{a_s}{Ancho_{trib}} \quad (72)$$

$$j_d = d - \frac{y}{3} \quad (73)$$

Donde:

- F_{LL} = Esfuerzo en el refuerzo debido por carga viva (kg/cm²)
- M_{fat} = Momento por combinación de carga viva por fatiga (Tnf -m)
- AS_{int} = Área del acero principal interno paralelo al tráfico (cm²)
- j_d = Distancia del brazo interno entre las cargas (cm)
- a_s = Área del acero principal interno, con el diámetro asumido (cm²)

2.4.5.1.3.2.Esfuerzo en el Refuerzo Debido a la Carga Permanente

$$f_{DL} = \frac{M_{DCint} + M_{DWint}}{AS_{int} * j_d} \quad (74)$$

Donde:

- f_{DL} = Esfuerzo en el refuerzo debido a carga permanente (kg/cm²)

2.4.5.1.4. Rango Máximo de Esfuerzo

Esfuerzo mínimo, esfuerzo por carga viva máxima combinado con el esfuerzo por cargas permanentes es:

$$f_{min} = 0 + f_{DL} \quad (75)$$

Esfuerzo máximo, esfuerzo por carga viva máxima combinado con el esfuerzo por cargas permanentes es:



$$f_{\text{máx}} = F_{LL} + f_{DL} \quad (76)$$

El rango máximo de esfuerzos es:

$$f = f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}} \quad (77)$$

El rango límite es:

$$f_{\text{límite}} = 1687 - 0.33 * f_{\text{mín}} \geq f \quad (78)$$

2.5. Optimización Matemática

2.5.1. Conceptos Básicos

La optimización es un procedimiento que trata de encontrar valores que deben tener ciertas variables las cuales minimizan o maximizan una función, además esas variables deben satisfacer ciertas condiciones.

La función que queremos maximizar o minimizar, se denomina función objetivo. Para el caso de estudio nuestra función objetivo debe representar el costo de la estructura.

Se define como variables aquellos parámetros que afectan directamente el valor de nuestra función objetivo; por ejemplo, las dimensiones de los elementos en una estructura (variables de diseño). Muchas de las variables están sujetas a ciertas condiciones o relaciones y que se denominan restricciones (Canale, 2007).

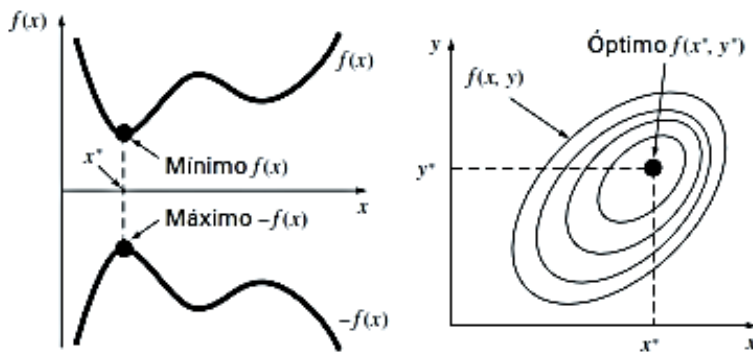
2.5.2. Clasificación

Otra forma de clasificar los problemas de optimización es según su dimensionalidad. En general se dividen en unidimensionales y multidimensionales. Los primeros involucran funciones que dependen de una sola variable independiente. la búsqueda consiste, entonces, en ascender o descender picos y valles unidimensionales.

Los *problemas multidimensionales* implican funciones que dependen de dos o más variables independientes. En el mismo sentido, la optimización bidimensional, de nuevo, se visualiza como una búsqueda de picos y valles. Sin embargo, justo como en un paseo campestre, no estamos limitados a caminar.

Finalmente, el proceso de encontrar un máximo o de encontrar un mínimo es, en esencia, idéntico, ya que un mismo valor se representa de la misma manera, pero con signo contrario, mínimo $f(x)$ y máximo $-f(x)$ (Canale, 2007).

Figura 15. Optimización unidimensional y bidimensional



Nota: Adaptado de Métodos Numéricos para Ingenieros, (Canale, 2007), Mc Graw Hill.

2.5.3. Técnicas de Optimización

Los problemas de optimización en su mayoría dependen de muchas variables y muchas restricciones; para encontrar las posibles soluciones en ese espacio multidimensional se debe recurrir a los métodos numéricos denominados programación matemática. A continuación, describiremos algunas de estas.

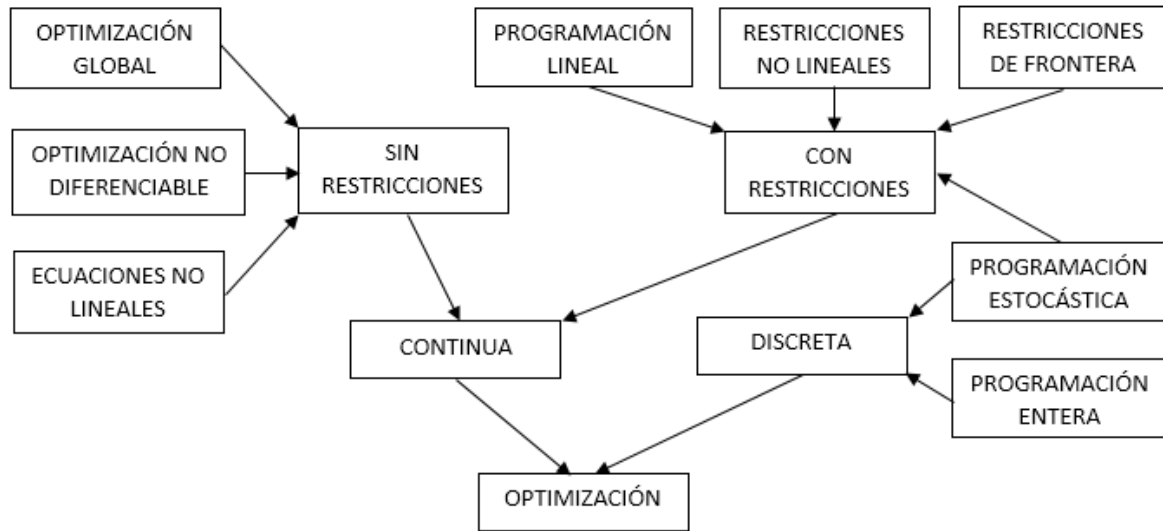
Optimización Discreta. Las variables en este tipo de problemas son discretas, por ejemplo, encontrar el óptimo de una función escogiendo el valor de las variables entre un número finito de posibles valores de esas variables o tal vez si se tienen variables enteras.

Optimización continua. Las variables en este tipo de problemas son continuas dentro de un rango, por tanto, los posibles valores de las variables son infinitas.

Optimización sin restricciones. En estos problemas solo se tiene la función objeto sin ninguna restricción.

Optimización con restricciones. Problemas en los que se tienen las funciones de restricción. Dentro de esas restricciones tenemos aquellas cuyas relaciones de las variables son lineales y otras son no lineales (Loayza, 2002).

Figura 16. Diagrama de los campos de optimización



Nota: Adaptado de Optimización de estructuras aporticadas de concreto armado, (Loayza, 2002), Universidad Nacional de Ingeniería

2.5.4. Optimización Global y Local

Un óptimo local de un problema de optimización es una solución óptima (un máximo o un mínimo) de un conjunto vecino de soluciones candidatas. En contraposición, un óptimo global es la solución óptima de entre todas las soluciones posibles. En relación a estos dos tipos de óptimos, se pueden distinguir entre algoritmos locales y globales. Los algoritmos de optimización local, en un caso general, sólo son capaces de detectar óptimos locales de las funciones objetivo. Por su parte los algoritmos de optimización global permitirían detectar óptimos globales, o al menos una buena aproximación de los mismos (Infantes, 2016).

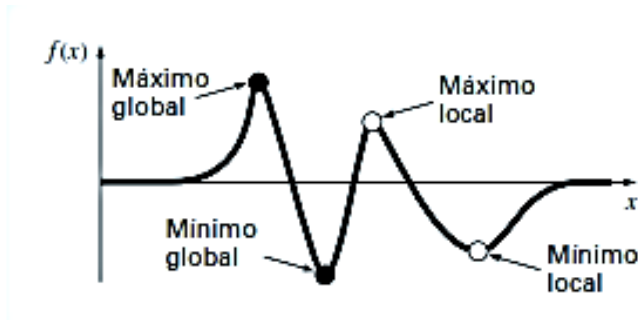
2.5.5. Optimización Unidimensional No Restringida

Esta sección describirá técnicas para encontrar el mínimo o el máximo de una función de una sola variable, $f(x)$ sin restricciones. Una imagen útil que muestra lo anterior es la consideración unidimensional a la “montaña rusa”, como la función representada en la

Figura 17.



Figura 17. Diagrama de aproximación asintótica de puntos locales y globales



Nota: Adaptado de Métodos Numéricos para Ingenieros, (Canale, 2007), Mc Graw Hill.

Los valores óptimos tanto locales como globales pueden presentarse en problemas de optimización. A tales casos se les llama *multimodales*. En casi todos los ejemplos, estaremos interesados en encontrar el valor máximo o mínimo absoluto de una función. Así, debemos cuidar de no confundir un óptimo local con un óptimo global. Distinguir un extremo global de un extremo local puede ser generalmente un problema, para ello se recomienda lo siguiente.

Primero, una idea del comportamiento de las funciones unidimensionales algunas veces llega a obtenerse en forma gráfica. Segundo, determinar el valor óptimo con base en valores iniciales, los cuales varían ampliamente y son generados quizá en forma aleatoria, para después seleccionar el mayor de éstos como el global.

Por último, cambiar el punto de inicio asociado con un óptimo local y observar si la rutina empleada da un mejor punto, o siempre regresa al mismo punto. Como en la localización de raíces, los problemas de optimización unidimensionales se pueden dividir en métodos cerrados y métodos abiertos (Canale, 2007).

2.5.6. Métodos de Optimización Unidimensional Sin Restricciones (OSR)

La fórmula de recurrencia, comúnmente utilizada en los métodos de optimización, es dada por:

$$x^{k+1} = x^k + a^k * d^k \tag{79}$$

donde: x^k es un punto de la iteración al k y d^k es una dirección de búsqueda.



Se necesita obtener el valor de la variable α^k , para que se pueda avanzar hacia el siguiente punto x^{k+1} . Es importante subrayar que la incógnita α es un escalar y, por lo tanto, esa tarea no es más compleja, pues consiste en buscar el mínimo de una función una variable $f(\alpha)$. Esta tarea se conoce en la literatura técnica como búsqueda unidimensional (line search, en inglés).

Los métodos de optimización unidimensional sin restricciones o no restringidas que usaremos son los presentados a continuación: Paso Constante o Incremental, Bisección y Sección Aurea (Menezes, 2011).

2.5.6.1. Método de Paso Constante o Incremental

El método de paso constante o incremental es el más simple de la familia de los métodos de búsqueda unidimensional y surgió asociado al método de dirección de búsqueda univariante, también el más primitivo de la familia de métodos de dirección de búsqueda. La idea básica de este método de paso constante consiste en la elección de un incremento $\Delta\alpha$ que se utilizará en la expresión:

$$\alpha^{i+1} = \alpha^i + \Delta\alpha; \quad i = 0, \dots, n \quad (80)$$

El valor de α^0 en la expresión debe ser igual a cero y el número de iteraciones debe ser el necesario para obtener el mínimo de $f(\alpha)$. A cada nuevo valor de $i+1$ en la iteración, $f(\alpha)$ debe evaluarse para saber si su valor es menor que el encontrado en la iteración anterior. Si no es así, se hace

$$\alpha^k = \alpha^i \quad (81)$$

y el valor de α , que minimiza $f(\alpha)$ se ha encontrado y se coloca en α^k , para avanzar para x^{k+1} .

El algoritmo de paso incremental adopta $\Delta\alpha$ constante en las dos primeras iteraciones. A partir de la tercera iteración al valor de $\Delta\alpha$ se dobla en relación con el valor anterior. Los incrementos para cada nueva iteración, a partir de la tercera, pasan a ser $2\Delta\alpha$, $4\Delta\alpha$, $8\Delta\alpha$, ... Se espera con ello acelerar el proceso iterativo y disminuir el número de evaluaciones de $f(\alpha)$. Como en el caso de $\Delta\alpha$ constante, el proceso iterativo se ha interrumpido tan pronto como se obtiene un α^{i+1} , para lo cual $f(\alpha)$ es mayor que en la iteración anterior. La elección de $\Delta\alpha$ es una tarea delicada, pues el incremento tiene que ser compatible con el orden de la magnitud de la variable x . La precisión de α^k depende del valor relativo de $\Delta\alpha$ en relación con el valor de α^k (Menezes, 2011).



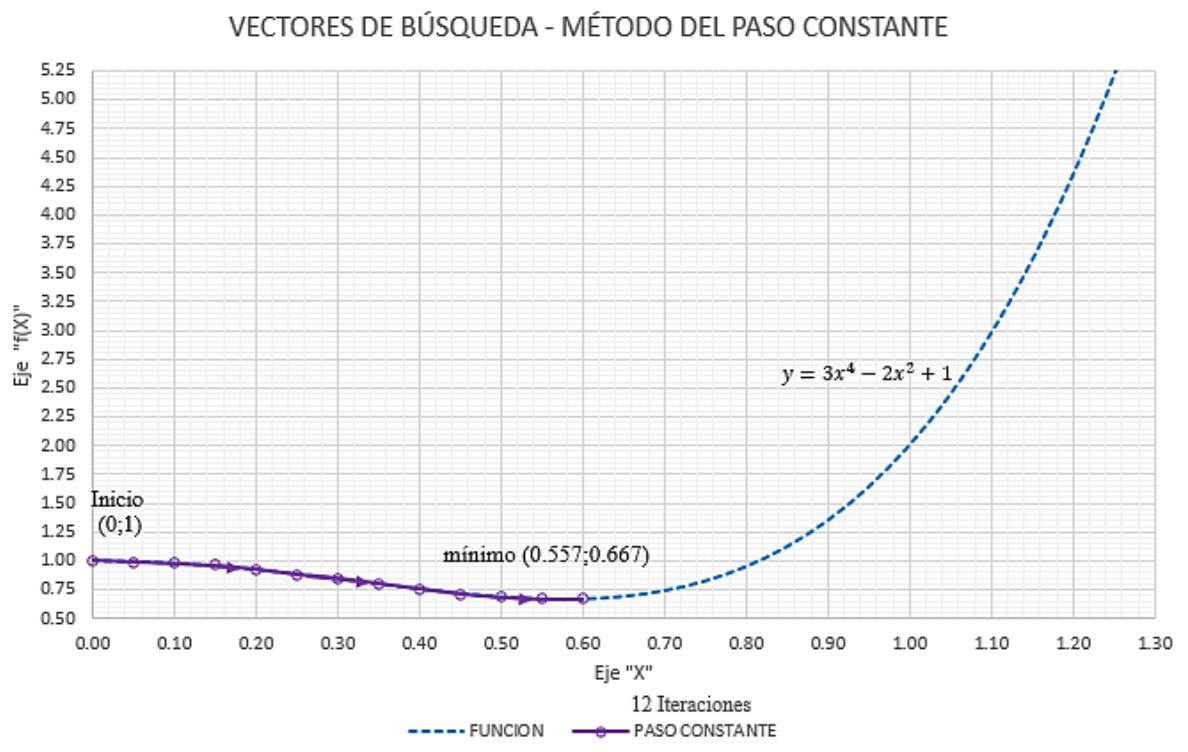
A modo de ejemplo, se plantea una función donde se determina los vectores de búsqueda de los diferentes métodos de optimización (paso constante, bisección y sección aurea) planteadas en nuestro estudio. Sea la función:

$$y = 3x^4 - 2x^2 + 1 ; \tag{82}$$

cuyo valor optimizado (mínimo) es $f(x)=0.6667$, con un incremento delta $\Delta=0.05$, rango de búsqueda de $[0,5]$, punto de partida inicial $[0,1]$, punto de llegada o mínimo $[0.600,0.669]$.

Obsérvese que para encontrar el valor mínimo de la función por el método del paso constante mostrando los vectores de búsqueda, fue necesario iterar 12 veces, tal como muestra la **Figura 18**.

Figura 18. Vector de búsqueda del mínimo por el método de paso constante



Nota: Esta figura muestra el vector de búsqueda de la función propuesta, por el método del paso constante, donde para llegar al mínimo el método utilizó 12 iteraciones.

2.5.6.2.Método de Bisección

En esencia, este método elimina exactamente la mitad del intervalo en cada paso. En este caso los puntos de búsqueda se encuentran más próximos entre sí, manteniendo la equidistancia con los bordes.



Este método tiene el objetivo de encontrar el mínimo de $f(\alpha)$, de la ecuación 80; en el intervalo o región de búsqueda.

$$0 \leq \alpha \leq \beta \quad (83)$$

En caso el mínimo no está en la región de búsqueda predeterminada, el método converge a

$$\alpha^k = 0, \quad \text{y para} \quad \alpha^k = \beta \quad (84)$$

Para la búsqueda del mínimo, el intervalo se subdivide en dos intervalos iguales, por el punto

$$\alpha = \frac{\beta}{2} \quad (85)$$

Cada uno de esos dos nuevos intervalos, a su vez, se subdivide en otros dos intervalos iguales y así sucesivamente. En cada nueva división, un intervalo es elegido para continuar la búsqueda del mínimo y el otro es descartado. Si se elige el intervalo descartado, se calcula f en el punto medio de los dos intervalos.

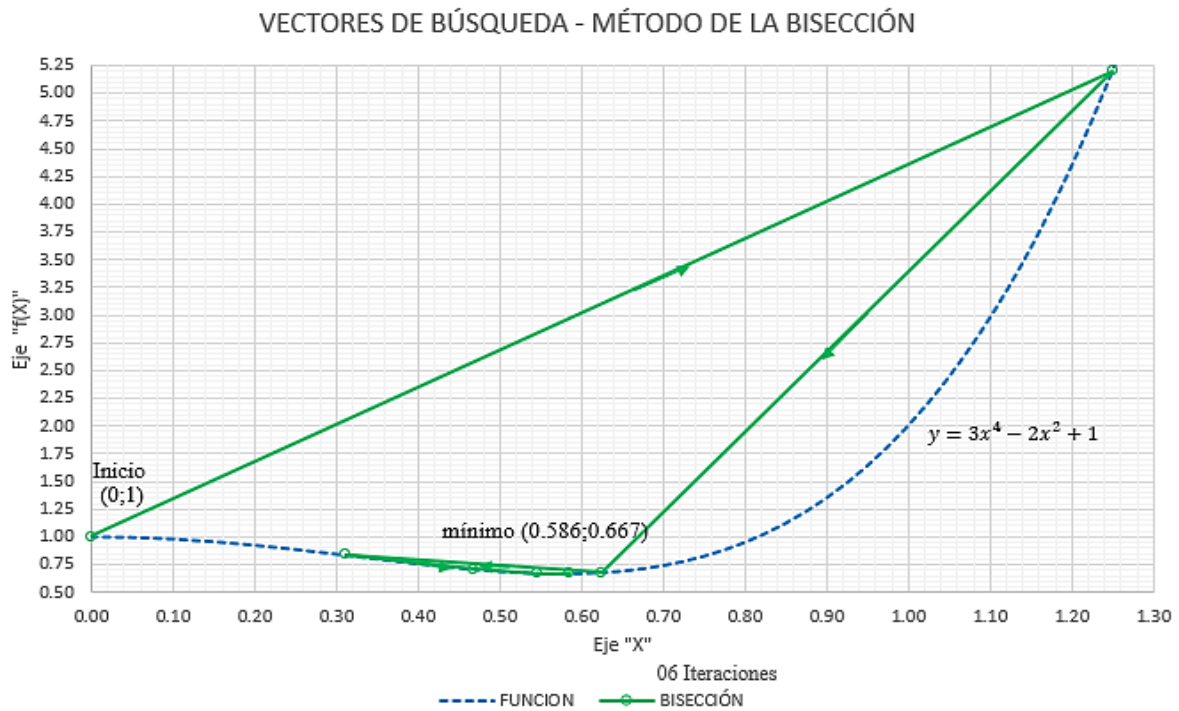
El intervalo descartado es el que presenta el mayor valor de f en su punto medio. La idea del método es la reducción progresiva de la región de búsqueda alrededor del mínimo. La precisión de α^k depende del criterio de convergencia adoptado para ver si interrumpe las iteraciones (Menezes, 2011).

Continuando con el ejemplo del ítem 2.5.6.2. cuyo valor optimizado (mínimo) es $f(x)=0.6667$, tolerancia 0.0001, rango de búsqueda de [0,5], punto de partida inicial [0,1], punto de llegada o mínimo [0.586,0.667].

Obsérvese que para encontrar el valor mínimo de la función por el método de la bisección mostrando los vectores de búsqueda, fue necesario iterar 6 veces, tal como muestra la **Figura 19**.



Figura 19. Vector de búsqueda del mínimo por el método de la bisección



Nota: Esta figura muestra el vector de búsqueda de la función propuesta, por el método de la bisección, donde para llegar al mínimo el método utilizó 06 iteraciones.

2.5.6.3. Método de Sección Aurea

(Menezes, 2011), sustenta que para explicar el concepto de la razón aurea, se debe introducir, inicialmente, la secuencia de Fibonacci. Que se denomina F_N , que genera números que comienzan con $N = 0$ y $F_0 = 1$ y sigue con $N = 1$ y $F = 1$. A partir de allí se utiliza la siguiente formula de recurrencia:

$$F_N = F_{N-1} + F_{N-2} \tag{86}$$

Con los números de Fibonacci F_N , puede ser definida la razón de Fibonacci, R_F , de la siguiente forma:

$$R_F = F_{N-1} / F_N \tag{87}$$



A continuación, se muestra una secuencia de números y razones de Fibonacci desde $N = 0$ hasta $N = 10$.

Tabla 12. Secuencia de Fibonacci para $N=0$ hasta $N=10$

N	F_N	R_F
0.0000	1.0000	-
1.0000	1.0000	1.0000
2.0000	2.0000	0.5000
3.0000	3.0000	0.6667
4.0000	5.0000	0.6000
5.0000	8.0000	0.6250
6.0000	13.0000	0.6154
7.0000	21.0000	0.6190
8.0000	34.0000	0.6176
9.0000	55.0000	0.6182
10.0000	89.0000	0.6180

Nota: Esta tabla muestra los rangos de valores (N) para las secuencias de Fibonacci (F_N) y determinar las razones de Fibonacci (R_F), adaptado de Programación matemática, (Menezes, 2011), Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro.

Es interesante observar que la razón de Fibonacci converge a un determinado valor, a lo largo de 0.618, que se denomina razón aurea (R_A). Este número aparece otras veces en las relaciones de la naturaleza como, por ejemplo: el número π y el número Neperiano e . Varios artistas, como Leonardo da Vinci, usaban en sus cuadros esa razón entre las dimensiones por encontrarla armoniosa. Da Vinci identificó también que esa razón podría encontrarse entre las dimensiones del cuerpo humano, como la razón entre la distancia de la planta del pie y el ombligo y la altura total del individuo.

El método de la Sección Aurea presenta una idea similar al de la Bisección. La diferencia está en la razón utilizada para reducir el intervalo de búsqueda. En el método de la Bisección esta razón es 0.5, mientras que en el método de la Sección Aurea utiliza la razón aurea. A partir de la longitud del intervalo de búsqueda inicial β , dos nuevos puntos son determinados:

$$\alpha 1_d = R_A * \beta \tag{88}$$

$$\alpha 1_e = (1 - R_A) * \beta \tag{89}$$

Estos definen dos nuevos intervalos,



$$0 \leq \alpha \leq \alpha_{1_d} \quad y \quad \alpha_{1_e} \leq \alpha \leq \beta \quad (90)$$

¿Qué intervalo se debe descartar en la próxima iteración?, para tomar esta decisión, se debe calcular $f(\alpha_{1_d})$ y $f(\alpha_{1_e})$; el punto correspondiente al mayor valor de la función f de este intervalo es descartado y, en consecuencia, da nuevos límites de búsqueda. Para α_{1_d} , el nuevo intervalo debe ser:

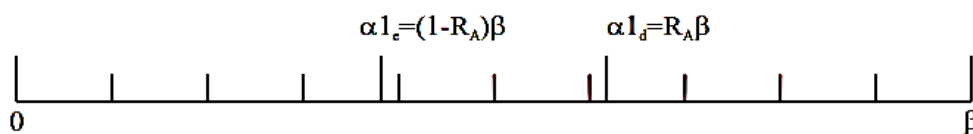
$$0 \leq \alpha \leq \alpha_{1_d} \quad (91)$$

sí es α_{1_e} , el nuevo intervalo será:

$$\alpha_{1_e} \leq \alpha \leq \beta \quad (92)$$

como se muestra en la **Figura 20**. Los subcritos “ d ” y “ e ” caracterizan los puntos del rango localizados en la derecha y en la izquierda, respectivamente.

Figura 20. Intervalos de búsqueda del Método de Sección Aurea



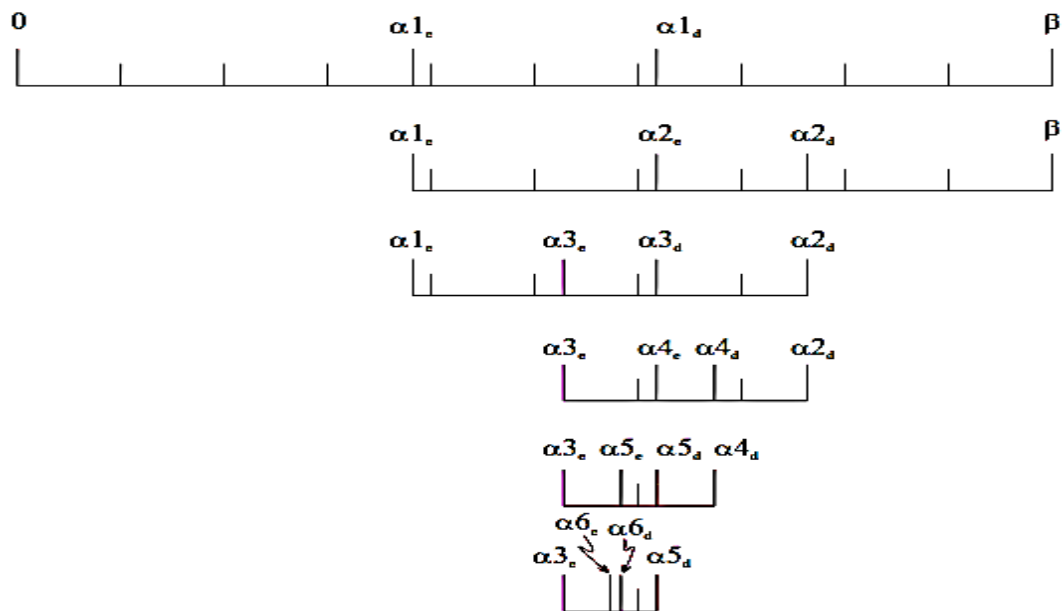
Nota: Adaptado de Programación matemática, (Menezes, 2011), Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro.

La ventaja de utilizar la razón aurea R_A para dividir los intervalos y no cualquier otra razón, está en el hecho de esta razón de ahorrar una evaluación de la función f por división de intervalo. Esto se debe a la coincidencia entre uno de los puntos nuevos y un punto antiguo de extremo de intervalo cuando se usa la razón aurea. Para esclarecer este punto, considere una razón cualquiera R en el procedimiento anterior y que el segundo intervalo $\alpha_{1_e} \leq \alpha \leq \beta$, ha sido elegido, como se muestra en la



Figura 21 (Menezes, 2011).

Figura 21. Longitud de Intervalos de búsqueda en el Método de Sección Aurea



Nota: Adaptado de Programación matemática, (Menezes, 2011), Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro.

La longitud del nuevo intervalo es dada por:

$$\beta - \alpha_{1_e} = \beta - (1 - R) * \beta = R\beta \quad (93)$$

Como el punto inicial del intervalo es α_{1_e} y su longitud $R\beta$, los dos nuevos puntos serian:

$$\alpha_{2_d} = \alpha_{1_e} + R(R\beta) \quad (94)$$

$$\alpha_{2_e} = \beta - R(R\beta) = (1 - R^2)\beta \quad (95)$$



Para que el nuevo punto α_{2e} coincida con el antiguo punto α_{1d} descartado, se debe tener:

$$R\beta = (1 - R^2)\beta \quad o \quad (96)$$

$$R^2 + R - 1 = 0 \quad (97)$$

con raíces iguales a:

$$R_1 = \left(\frac{-1+\sqrt{5}}{2}\right) = 0.61803 \quad (98)$$

$$R_2 = \left(\frac{-1-\sqrt{5}}{2}\right) = 0.61803 \quad (99)$$

Despreciando la raíz negativa, el valor de R para ahorrar una evaluación de f en cada subdivisión de los dos intervalos es exactamente igual a la razón aurea, i.e., $R_A = 0.61803\dots$

La precisión de α^k depende, como en los métodos anteriores, del criterio de convergencia adoptado en el procedimiento iterativo (Menezes, 2011).

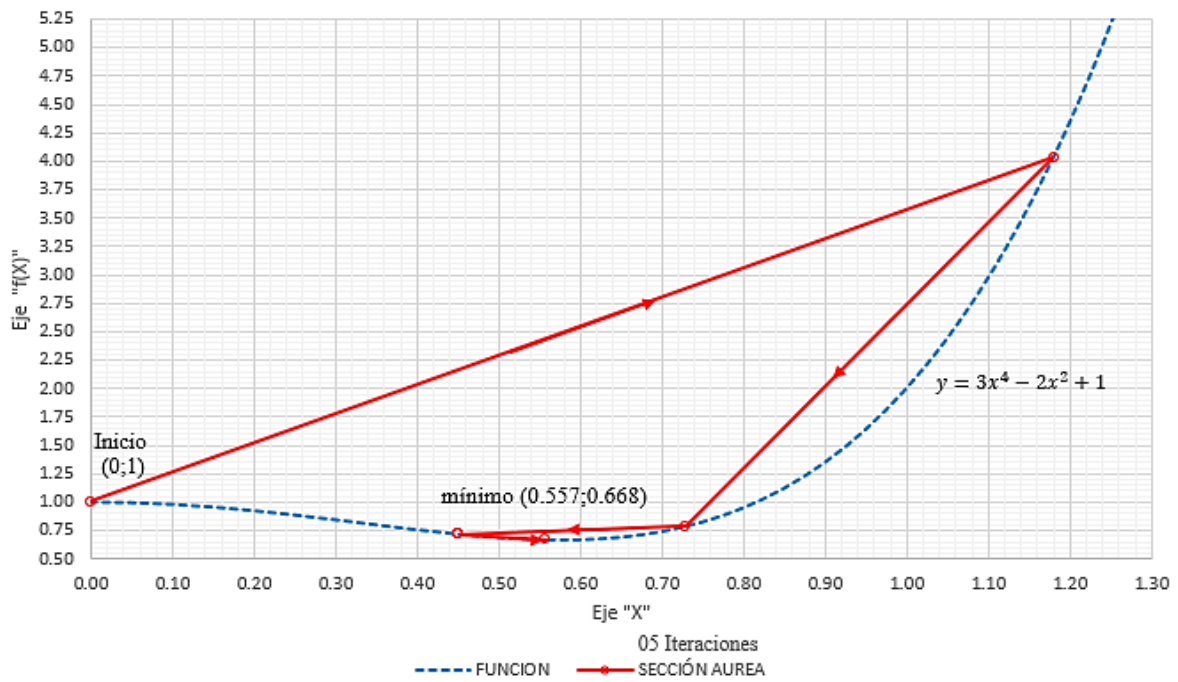
Continuando con el ejemplo del ítem 2.5.6.2. cuyo valor optimizado (mínimo) es $f(x)=0.6667$, tolerancia 0.0001, rango de búsqueda de [0,5], punto de partida inicial [0,1], punto de llegada o mínimo [0.557,0.668].

Obsérvese que para encontrar el valor mínimo de la función por el método de la sección aurea mostrando los vectores de búsqueda, fue necesario iterar 5 veces, así mismo se muestra un gráfico resumen con sus vectores de búsqueda de los tres métodos expuestos, tal como muestra la **Figura 22.**, donde el método que converge rápidamente es el de la sección aurea, con 5 iteraciones; seguido del método de la bisección con 6 iteraciones y finalmente el método del paso constante con 12 iteraciones.

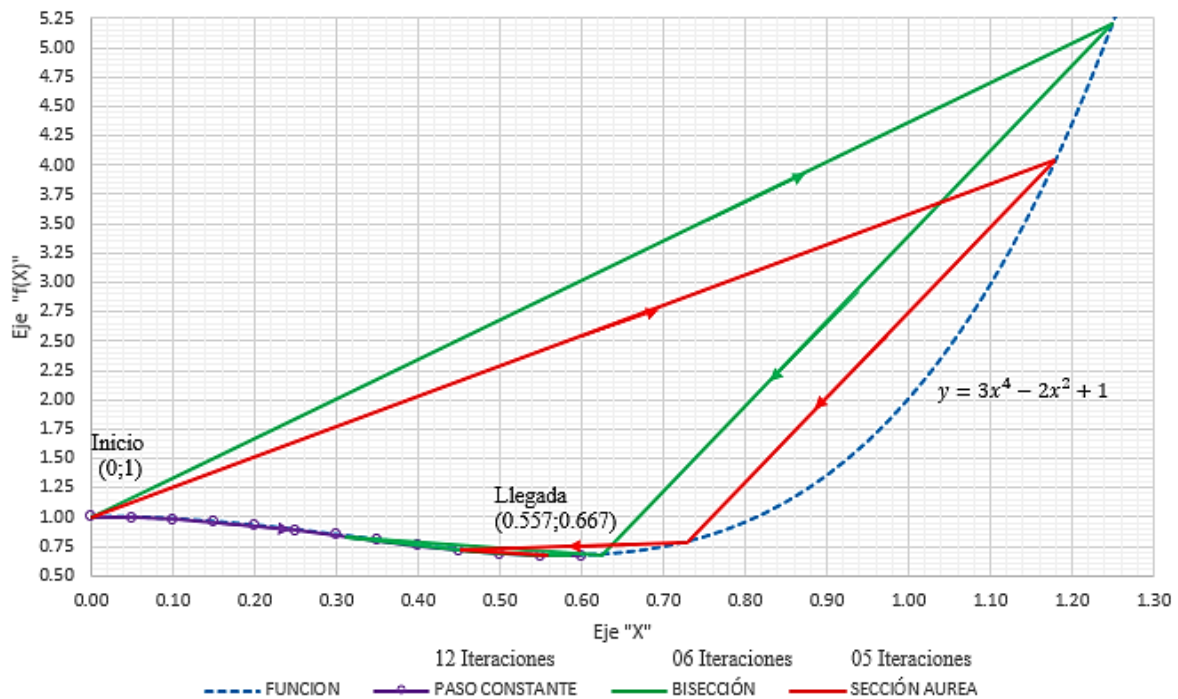
Figura 22. Vector de búsqueda del mínimo por el método de la sección aurea



VECTORES DE BÚSQUEDA - MÉTODO DE LA SECCIÓN AUREA



VECTORES DE BÚSQUEDA POR VARIOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN



Nota: Esta figura muestra el vector de búsqueda de la función propuesta, por el método de la sección aurea, donde para llegar al mínimo el método utilizó 05 iteraciones; también muestra la comparación de los vectores de búsqueda por los tres métodos expuestos.



2.5.7. Optimización Estructural Aplicada a Puentes

Los inicios de la ingeniería de puentes, al menos como hoy la entendemos, se produjeron a partir de las primeras teorías acertadas sobre el comportamiento de las estructuras y sus materiales. Es entonces cuando se hace posible, por primera vez, la predicción del comportamiento de un puente de forma previa a su construcción.

La principal consecuencia de esta nueva forma de proceder es que se podían plantear diferentes diseños y, teóricamente al menos, determinar cuál sería el que iba a necesitar menos material, sin mermar la resistencia por debajo de lo admisible.

Pero este análisis estructural por sí solo no era suficiente para lograr un diseño óptimo. Pronto se comprendió que la optimización de un puente requiere de los principios de la optimización matemática. Y puesto que las bases teóricas de la optimización matemática ya estaban establecidas, la optimización estructural pudo surgir casi simultáneamente con las primeras teorías de estructuras.

Hoy en día la optimización estructural ha proporcionado potentes herramientas de diseño, pero no se aplica de forma explícita y sistemática al diseño de puentes. Solo en contados casos la optimización va más allá de una simple adopción de reglas de pre dimensionamiento, sancionadas por la práctica, y en procesos recurrentes de ajuste de un diseño inicial, en un mero intento de reducir los costes de ejecución; pero la mayoría de los puentes que se proyectan en la actualidad son de hormigón, en los que interesa más optimizar el coste que el peso (Alcalá Gonzáles, 2009).

2.5.8. Formulación Matemática de la Función Objetivo

2.5.8.1. Función Objetivo Principal

2.5.8.1.1. Función Costo Referencial

Toda optimización, es un proceso matemático donde intervienen coeficientes y variables, cuyo resultado es el que se ajuste mejor a la función, entonces toda optimización debe contener una función la cual es denominada “función objetivo”. Para la formulación matemática de nuestra función objetivo implementaremos un algoritmo de optimización la cual contiene lo siguiente, primero debemos establecer una función lineal, la denominaremos función objetivo, esta función medirá el costo directo referencial final de nuestro estudio. Se opta por una función lineal o de primer grado con tres variables, variables dependientes del



peralte, a la vez estas engloban otras funciones secundarias lineales como: el peso del acero total, volumen de concreto total y área de encofrado total.

$$\text{Costo}(h) = \text{VolConc}(h) * \text{PU}_{\text{conc}} + \text{PesoAcero}(h) * \text{PU}_{\text{acero}} + \text{Encof}(h) * \text{PU}_{\text{encof}} \quad (100)$$

Donde:

- h = Peralte de losa, variable independiente de la función
- $\text{Costo}(h)$ = Función objetivo principal (soles)
- VolConc = Subfunción volumen de concreto total (m³)
- PesoAcero = Subfunción peso del acero de refuerzo total (Tnf)
- Encof = Subfunción área de encofrado (m²)
- PU_{conc} = Peso unitario referencial del concreto (soles)
- PU_{acero} = Peso unitario referencial del acero de refuerzo (soles)
- PU_{encof} = Peso unitario referencial del encofrado (soles)
-

Algoritmo matemático desarrollado en maple 2015, para la función objetivo principal y subfunciones (volumen de concreto, área de encofrado y peso del acero de refuerzo).

2.5.8.1.2. Función Volumen de Concreto

Sea la subfunción lineal dependiente volumen de concreto, con una variable independiente “ h ” y coeficientes constantes como AnchoTabl y la LuzPuente . esta función permite determinar la cantidad de volumen de concreto óptima que genera un peralte óptimo.

$$\text{VolConc} = \text{AnchoTablero} * \text{LuzPuente} * h \quad (101)$$

Donde:

- h = Peralte de losa, variable independiente de la función secundaria (m)
- VolConc = Función secundaria volumen de concreto total (m³)
- AnchoTabl = Ancho total sección transversal, incluye calzada y barreras (m)
- LuzPuente = Longitud del puente entre ejes (m)



2.5.8.1.3. Función Área del Encofrado

Sea la subfunción lineal dependiente área de encofrado, con una variable independiente “h” y coeficientes constantes como *AnchoTablero* y la *LuzPuente*. esta función permite determinar la cantidad de área de encofrado optima que genera un peralte óptimo.

$$AreaEncof = AnchoTabl * LuzPuente + 2h * LuzPuente + 2h * AnchoTabl \quad (102)$$

Donde:

- h = Peralte de losa, variable independiente de la función secundaria (m)
- AreaEncof = Función secundaria área de encofrado total (m²)
- AnchoTabl = Ancho total sección transversal, incluye calzada y barreras (m)
- LuzPuente = Longitud del puente entre ejes (m)

2.5.8.1.4. Función Peso del Acero de Refuerzo

Sea la subfunción lineal peso del acero de refuerzo, con variables dependientes *AsPrinc*, *AsDistrib*, *AsTemp*, *MdisResistencia*, *MdisServicio*, *MdisFatiga* del peralte “h” y coeficientes constantes como *PE_{ACERO}*, *b*, *AnchoTablero*, *LuzPuente*. Esta función permite determinar la cantidad del peso del acero de refuerzo optima que genera un peralte óptimo. Se deberá analizar la función *PesoAcero*, para los diferentes estados límites de resistencia, servicio y fatiga.

$$PesoAcero = (AsPrinc + AsDistrib + 2AsTemp) * PE_{ACERO} * b \quad (103)$$

$$AsPrinc = Proc(MdisResistencia, MdisServicio, MdisFatiga) \quad (104)$$

$$AsDistrib = AsPrinc * \min\left(0.5, \frac{55}{\sqrt{LuzPuente}}\right) \quad (105)$$

$$AsTemp = \frac{9 * AnchoTabl * h}{100 * (AnchoTabl + h)} \quad (106)$$

Donde:

- PesoAcero = Peso del acero de refuerzo para un ancho referencial (Tnf)
- PE_{ACERO} = Peso unitario del acero de refuerzo (Tnf /m³)
- b = Ancho del tablero total del puente (m)
- AsPrinc = Área del acero principal (cm²)
- MdisResistencia= Momento flector de diseño por estado límite de resistencia (Tnf -m)



- $M_{disServicio}$ = Momento flector de diseño por estado límite de servicio (Tnf -m)
- $M_{disFatiga}$ = Momento flector de diseño por estado límite de fatiga (Tnf -m)
- $A_{sDistrib}$ = Área del acero de distribución (cm²)
- $L_{uzPuente}$ = Longitud del puente entre ejes (m)
- A_{sTemp} = Área del acero de temperatura (cm²/m)
- $AnchoTabl$ = Ancho de franja en el tablero sección transversal (100 cm)
- h = Peralte de losa, variable independiente de la función secundaria (cm)

2.6. Hipótesis

2.6.1. Hipótesis General

La diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018 es que el optimizado disminuye el peralte, volumen del concreto, peso del acero, área del encofrado y el costo directo referencial.

2.6.2. Hipótesis Específicas

Hipótesis específica 01. La función objetivo para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es función únicamente del peralte de la losa que es directamente proporcional al costo directo referencial.

Hipótesis específica 02. La diferencia del peralte entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.

Hipótesis específica 03. La diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.

Hipótesis específica 04. La diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del



ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.

Hipótesis específica 05. La diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.

Hipótesis específica 06. La diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.

2.7. Definición de Variables e Indicadores

2.7.1. Variables Independientes

X1: Diseño de puentes sin optimizar por el método del ancho equivalente de franjas

Metodología aproximada de análisis estructural en puentes tipo losa de concreto armado, que según el Art. 2.6.4.2 del Manual del MTC 2018 recomienda dividir el tablero (cualquier parte de la sección del tablero) en franjas paralelas al tráfico y determinar parámetros de diseño. Los parámetros de diseño estudiados son: peraltes, volumen de concreto, áreas de encofrado, peso del acero y costo directo.

2.7.1.1. Subvariables, Dimensiones o Nivel

- Peralte de la losa

2.7.1.2. Indicadores de Variables Independientes

- Altura del peralte de la losa (m)

2.7.2. Variables Dependientes

X2: Diseño de puentes con Optimización

Metodología de análisis matemático, aplicado al diseño de puentes tipo losa de concreto armado sin optimizar, que encuentra el valor óptimo (valor mínimo) dentro de un conjunto de valores. En nuestro estudio los parámetros de diseño como peraltes, volumen de concreto,



áreas de encofrado y peso del acero, vienen a conformar la función objetivo que es el parámetro costo directo.

2.7.2.1. Subvariables, Dimensiones o Nivel

- Peralte optimizado
- Volumen del Concreto optimizado
- Área del Encofrado optimizado
- Peso del Acero optimizado
- Costo Directo optimizado

2.7.2.2. Indicadores de Variables Independientes

- Altura del peralte de la losa (m)
- Volumen (m^3)
- Áreas (m^2)
- Momentos flectores (Tnf-m), fuerzas cortantes (Tnf), deflexiones (mm)
- Peso del acero (Tnf)
- Costo (Soles)

2.7.3. Cuadro de Operacionalización de Variables



Tabla 13. Cuadro de Operacionalización de variables

"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"						
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES						
Tipo	Variable	Descripción de la variable	Dimensión o Nivel	Indicadores	Unidad	Herramientas metodológicas o Instrumentos
Variables Independientes	X1: Diseño de puentes sin optimizar por el método del ancho equivalente de franjas	Metodología aproximada de análisis estructural en puentes tipo losa de concreto armado, que según el Art. 2.6.4.2 del Manual del MTC 2018 recomienda dividir el tablero (cualquier parte de la sección del tablero) en franjas paralelas al tráfico y determinar parámetros de diseño. Los parámetros de diseño estudiados son: peraltes, volumen de concreto, áreas de encofrado, peso del acero y costo directo.	Peralte de la losa	Altura del peralte de la losa	(m)	Manual de Puentes del MTC 2018 AASHTO LRFD 2017 Hojas de cálculo Guías de observación Libros de seguimiento Programas Informáticos
Volumen del Concreto optimizado	Volumen	(m ³)				
Área de Encofrado optimizado	Área	(m ²)				
Peso del Acero optimizado	Momentos Flectores	(Tonf-m)				
	Fuerzas cortantes	(Tonf)				
	Deflexiones	(mm)				
	Áreas de acero	(cm ²)				
Costo Directo optimizado	Costo	(Soles)				



3. Capítulo III: Metodología

3.1. Metodología de la Investigación

3.1.1. Enfoque de la Investigación

El tipo o enfoque de nuestra investigación de tesis es **cuantitativa** ya que permite cuantificar y medir variables asociados a la optimización matemática en puentes tipo losa.

En él se miden parámetros de diseño con optimización matemática aplicada a puentes tipo losa de concreto armado, como parámetros tenemos: peralte, volumen del concreto, peso del acero de refuerzo, área de encofrado y costo directo referencial (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

3.1.2. Nivel o Alcance de la Investigación

El nivel o alcance de nuestra investigación de tesis es **descriptiva** porque busca especificar y estimar magnitudes como el peralte, volumen del concreto, peso del acero de refuerzo, área de encofrado y costo directo referencial, mediante una optimización matemática aplicada al diseño de puentes tipo losa por el método del ancho equivalente de franjas según tipifica el Manual de Puentes del MTC 2018.

También posee un nivel **correlacional** puesto que la investigación muestra la comparación de las magnitudes de los parámetros (peralte, volumen del concreto, peso del acero de refuerzo, área de encofrado y costo directo referencial) entre un diseño de puentes tipo losa por el método del ancho equivalente de franjas que el Manual de Puentes del MTC 2018 refiere y los obtenidos por optimización matemática (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

3.1.3. Método de Investigación

El método de nuestra investigación es **hipotético deductivo o científico** porque partimos de suposiciones planteadas las cuales serán demostradas mediante los resultados que se obtenga al finalizar la investigación.



3.2. Diseño de la Investigación

3.2.1. Diseño Metodológico

Según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) un diseño experimental se refiere a elegir o realizar una acción y después observar las consecuencias. Otra acepción particular más armónica con un sentido científico, se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador.

El presente trabajo de investigación posee un diseño metodológico del tipo **EXPERIMENTAL**, porque la variable independiente descrita es manipulada, para evaluar y analizar el comportamiento de las variables dependientes. Se manipula la variable independiente (peralte de la losa) de un diseño sin optimizar, para consecuentemente ver el comportamiento de las variables dependientes (volumen de concreto, peso del acero, área de encofrado y costo directo referencial) de un diseño optimizado, y finalmente comparar y obtener resultados.

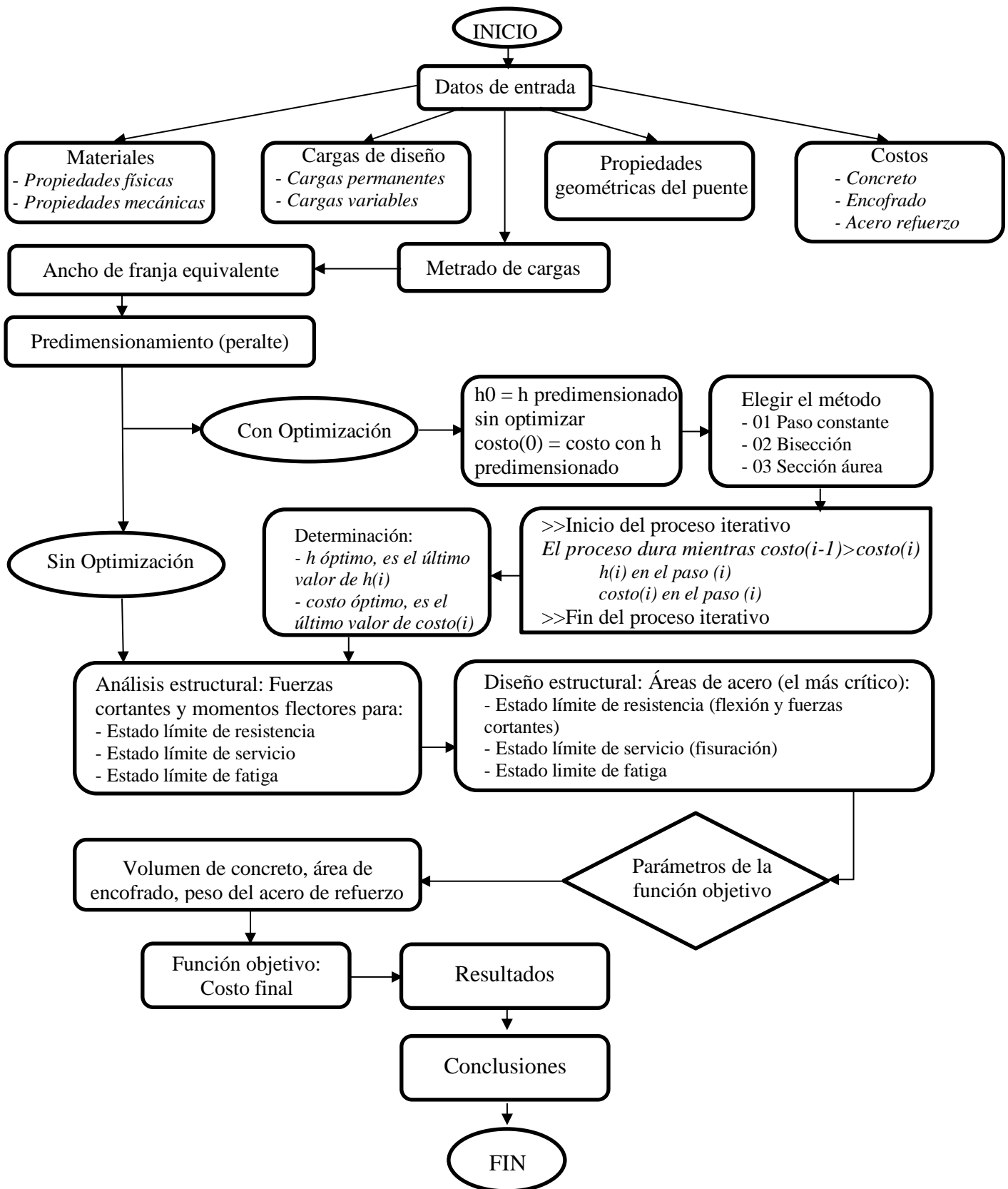
3.2.2. Diseño de Ingeniería

3.2.2.1. Flujograma del Estudio de la Tesis

Título: “Estudio comparativo entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del manual de puentes MTC 2018”.



Figura 23. Flujograma del proceso de investigación





3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

3.3.1.1. Descripción de la Población

Nuestra población es de elección por conveniencia del investigador donde se ha escogido puentes tipo losa de concreto armado con luces que comprenden desde los 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m.

La población de nuestra investigación está comprendida y es replicable en todo el territorio nacional.

Además, la población cuenta con ciertas particularidades:

- Análisis y diseño específico de la superestructura (tableros).
- Tableros (losa) paralelos al tráfico.
- Considera apoyos isostáticos (unos fijos y los otros móviles)
- Puente de un solo tramo, tramo simple.
- La resistencia del concreto es $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$ y fluencia del acero $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$.
- Barrera de protección tipo New Jersey con un ancho de 0.40 m y un peso de 600kg/m.
- El ancho total de la sección transversal tiene una magnitud constante de 8.40m, incluye la calzada y el ancho de las barreras de protección.
- La carga del diseño vehicular es HL-93

3.3.1.2. Cuantificación de la Población

La población está cuantificada por diecisiete puentes tipo losa, la elección de las luces de los puentes es por decisión y conveniencia del investigador. Esta población comprende la evaluación a nivel del análisis y diseño de parámetros como el volumen de concreto, peso del acero, área de encofrado y costo referencial dependientes de la variable peralte de la losa, entre un diseño sin optimizar respecto de otro optimizado.



3.3.2. Muestra

3.3.2.1. Descripción de la Muestra

Se trata de una muestra tipo censal, ya que se pretende estudiar al 100% de la población es decir estudiara los diecisiete puentes tipo losa de concreto armado, donde la muestra es igual a la población.

3.3.2.2. Cuantificación de la Muestra

La cuantificación de la muestra al igual que la población está compuesta por diecisiete puentes tipo losa de concreto armado con luces comprendidas desde los 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m. la elección de las luces de los puentes es por decisión y conveniencia del investigador.

3.3.2.3. Método de Muestreo

El método de muestreo es del tipo NO PROBABILÍSTICO, ya que el investigador no realizara una selección al azar o probalística, del subtipo por CONVENIENCIA donde el investigador ha seleccionado una muestra teórica hipotética (espacio donde se pretende validar nuestra investigación), en base a criterios y conocimientos por conveniencia, interés y comodidad, ya establecidos, donde a través de la evaluación de los parámetros de análisis y diseño de un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado, se pretende inferir y dar validez de nuestra propuesta de investigación para una población de puentes tipo losa con luces comprendidas de entre 4.00m y 12.00m.

3.3.2.4. Criterios de Evaluación de Muestra

Para la evaluación de la muestra se tomaron en cuenta diecisiete puentes tipo losa de concreto armado con luces comprendidas de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m y se aplicaron ciertos criterios de inclusión que pretenden establecer y cumplir ciertas especificaciones para su evaluación.

3.3.3. Criterios de Inclusión

Se consideraron los siguientes criterios de inclusión:



- Metodología de análisis y diseño por métodos aproximados (método del ancho equivalente de franjas)
- Superestructura de concreto armado paralelas al tráfico (tableros), de un solo tramo (tramo simple) con longitudes que comprenden de 4.00 m a 12.00 m.
- Optimización matemática unidimensional de una sola variable, donde la variable a optimizar es el peralte de la losa.
- Determinación de la función objetivo por tres métodos de optimización, paso constante, bisección y sección aurea.
- Análisis de momentos flectores, fuerzas cortantes y deflexiones; y diseño de la función objetivo compuesta por el: volumen de concreto, peso del acero de refuerzo, área de encofrado y el costo directo referencial.
- Evaluación para los estados límites de resistencia I, servicio I y fatiga I.
- Estructuras isostáticas con apoyos simple (unos fijos y los otros móviles)
- Resistencia del concreto es $f'c=280$ kg/cm² y fluencia del acero $f_y=4200$ kg/cm².
- Barrera de protección tipo New Jersey con un ancho de 0.40 m y un peso de 600 kg/m.
- Carga del diseño vehicular HL-93



3.4. Instrumentos

3.4.1. Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1.1. Guías de Observación

3.4.1.1.1. Declaración de Variables

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO			
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA			
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"				
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR				
FECHA:					
FORMATO N° 01: DECLARACIÓN DE VARIABLES					
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE GEOMETRÍA					
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN	
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS					
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN	
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS					
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN	
DECLARACIÓN DE LAS CARGAS PERMANENTES					
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN	
DECLARACIÓN DE LAS CARGAS VARIABLES					
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN	



DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE DISEÑO				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE COSTOS				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE DISCRETIZACIÓN				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN

3.4.1.1.2. Evaluación de Momentos Flectores discretizados y máximos en los Estados Límites de Resistencia, Servicio y Fatiga, sin Optimizar y Optimizados

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N° 02: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES EN EL ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES POR RESISTENCIA (Tonf-m)									
ITEM		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
		Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
				Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 03: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES EN EL ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES POR FISURA (Tonf-m)									
ITEM		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
				PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
		Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 04: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES EN EL ESTADOS LÍMITE DE FATIGA

EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES POR FATIGA (Tonf-m)									
ITEM		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
				PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
		Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 05: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS DISCRETIZADOS POR VARIOS ESTADOS LÍMITE

EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS DISCRETIZADOS POR VARIOS ESTADOS LÍMITES

ITEM	LONG PUENTE (m)	MOMENTOS POR RESISTENCIA				MOMENTOS POR SERVICIO				MOMENTOS POR FATIGA			
		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS - SECCIÓN AUREA		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS - SECCIÓN AUREA		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS - SECCIÓN AUREA	
		Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 06: EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) SIN OPTIMIZAR

EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES SIN OPTIMIZAR, POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

ITEM	LONG PUENTE (m)	X max (m)	MOMENTOS POR CARGAS						
			VIVAS (HL-93)			PERMANENTES			
			Tandem (Tnf-m)	Carril Diseño S/C (Tnf-m)	Viva+33% Impacto (Tnf-m)	Muerta DC (Tnf-m)	Muerta DW (Tnf-m)	Momento máximo (Tnf-m)	



 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N°07: EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) OPTIMIZADOS

ITEM	LONG PUENTE (m)	X max (m)	MOMENTOS POR CARGAS					
			VIVAS (HL-93)			PERMANENTES		
			Tandem (Tnf-m)	Carril Diseño S/C (Tnf-m)	Viva+33% Impacto (Tnf-m)	Muerta DC (Tnf-m)	Muerta DW (Tnf-m)	Momento máximo (Tnf-m)

3.4.1.1.3. Evaluación de Fuerzas Cortantes Discretizadas y Máximas en Estado Límite de Resistencia, sin Optimizar y Optimizados

 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N°08: EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES MÁXIMAS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) SIN OPTIMIZADOS

ITEM	LONG PUENTE (m)	FUERZAS CORTANTES POR CARGAS					
		VIVAS (HL-93)			PERMANENTES		
		Camión ó Tandem(*) (Tnf)	Carril Diseño S/C (Tnf)	Viva+33% Impacto (Tnf)	Muerta DC (Tnf)	Muerta DW (Tnf)	Fuerzas cortantes máximas (Tnf)



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N°09: EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES MÁXIMAS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) OPTIMIZADOS

EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES OPTIMIZADAS (POR SECCIÓN AUREA), POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA							
ITEM	LONG PUENTE (m)	FUERZAS CORTANTES POR CARGAS					
		VIVAS (HL-93)			PERMANENTES		
		Camión ó Tandem(*) (Tnf)	Carril Diseño S/C (Tnf)	Viva+33% Impact o (Tnf)	Muerta DC (Tnf)	Muerta DW (Tnf)	Fuerzas cortantes máximas (Tnf)



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 10: EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES MÁXIMAS DISCRETIZADAS Y DEFLEXIONES

EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES MÁXIMAS POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA									
ITEM	LONG PUENTE (m)	VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
		Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)	PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
				Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)	Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)	Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)



3.4.1.1.4. Evaluación del Acero de Refuerzo por Estados Límites de Resistencia, Servicio y Fatiga; sin Optimizar y Optimizados por Paso Constante

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N° 11: EVALUACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO POR MÁXIMO ESTADO LÍMITE (RESISTENCIA,SERVICIO Y FATIGA), SIN OPTIMIZAR Y OPTIMIZADO

ITEM	VALORES SIN OPTIMIZAR						VALORES OPTIMIZADOS POR PASO CONSTANTE					
	AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA		AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA	
	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)

3.4.1.1.5. Evaluación del Acero de Refuerzo en Estados Límites de Resistencia, Servicio y Fatiga; y Optimizados por Bisección y Sección Aurea

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N° 12: EVALUACIÓN DEL ACERO POR MÁXIMO ESTADO LÍMITE (RESISTENCIA,SERVICIO Y FATIGA), OPTIMIZADO (BISECCION Y SECCION AUREA)

ITEM	VALORES OPTIMIZADOS POR BISECCIÓN						VALORES OPTIMIZADOS POR SECCIÓN AUREA					
	AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA		AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA	
	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)

3.4.1.1.6. Optimización de Peraltes por los Métodos de Paso Constante, bisección y Sección Aurea



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 13: OPTIMIZACIÓN DE LOS PERALTES POR EL MÉTODO PASO CONSTANTE

DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE PERALTE (cm)							
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE OPTIMIZADO POR PASO CONSTANTE				PERALTE ÓPTIMO (cm)
			POR RESISTENCIA (cm)	POR SERVICIO (cm)	POR FATIGA (cm)	POR FUERZA CORTANTE (cm)	



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 14: OPTIMIZACIÓN DE LOS PERALTES POR EL MÉTODO BISECCIÓN

DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE PERALTE (m)							
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE OPTIMIZADO POR BISECCIÓN				PERALTE ÓPTIMO (cm)
			POR RESISTENCIA (cm)	POR SERVICIO (cm)	POR FATIGA (cm)	POR FUERZA CORTANTE (cm)	



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 15: OPTIMIZACIÓN DE LOS PERALTES POR EL MÉTODO SECCIÓN AUREA

DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE PERALTE (m)

ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE OPTIMIZADO POR SECCIÓN AUREA				PERALTE ÓPTIMO (cm)
			POR RESISTENCIA (cm)	POR SERVICIO (cm)	POR FATIGA (cm)	POR FUERZA CORTANTE (cm)	

3.4.1.1.7. Evaluación de Parámetros de la Función Objetivo Sin Optimizar y Optimizados por Sección Aurea



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 16: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN OBJETIVO SIN OPTIMIZAR

ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO - COSTO DIRECTO REFERENCIAL				
		PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	VOLUMEN CONCRETO (m ³)	ÁREA DE ENCOFRADO (m ²)	PESO DEL ACERO (Tonf)	COSTO FINAL (soles)



	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO					
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA					
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"					
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR					
FECHA:						
FORMATO N° 17: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN OBJETIVO OPTIMIZADA - SECCIÓN AUREA						
		EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO - COSTO DIRECTO REFERENCIAL				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE ÓPTIMO (cm)	VOLUMEN CONCRETO (m3)	ÁREA DE ENCOFRADO (m2)	PESO DEL ACERO (Tonf)	COSTO FINAL (soles)

3.4.2. Instrumentos de Ingeniería

- Manual de Puentes del MTC 2018
- AASHTO LRFD American Association of State Highway and Transportation Officials 2017
- Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Peruana E.060 Concreto Armado.
- Programa informático Maple 2015
- Programa informático AutoCad 2016



Figura 24. *Interfaz del programa informática Maple 2015, versión educativa*

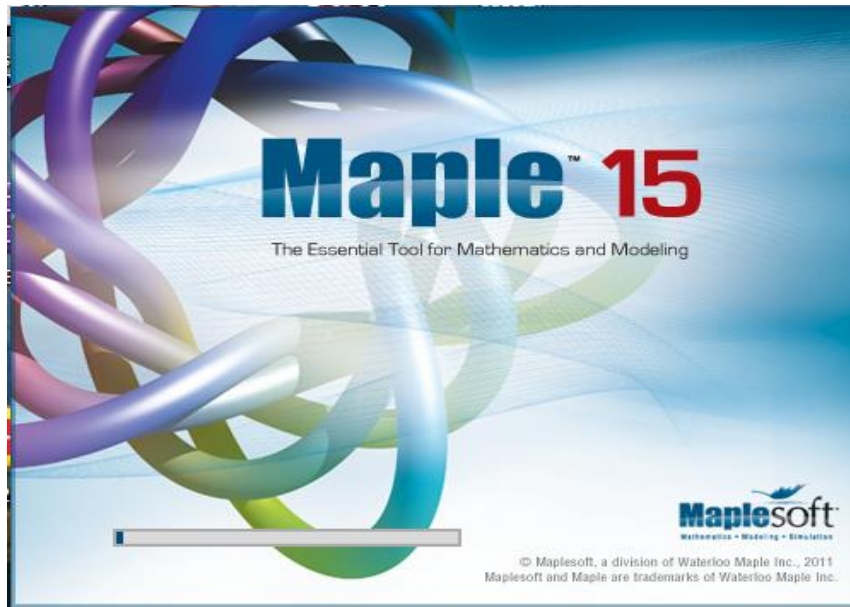
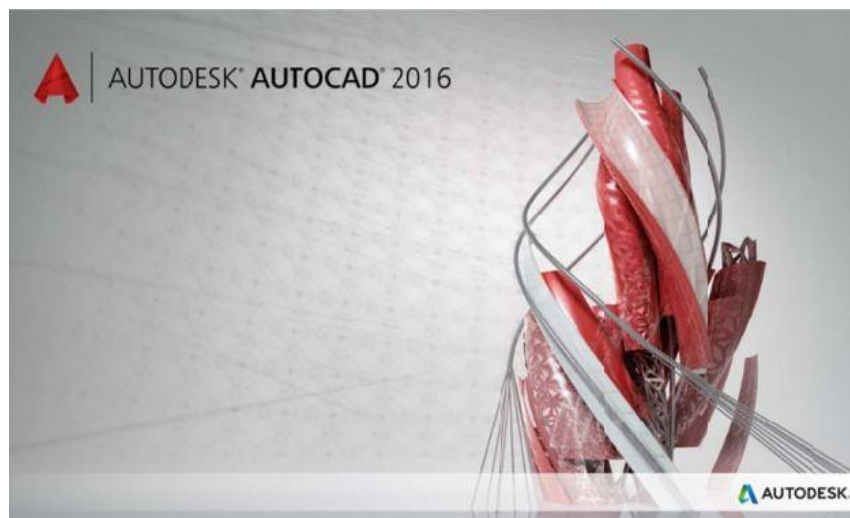


Figura 25. *Interfaz del programa informática AutoCad 2016, versión educativa*



3.5. Procedimientos de Recolección de Datos

3.5.1. Discretización

Se ha determinado discretizar (dividir la longitud del puente en tramos más pequeños) la longitud del puente en 10 tramos y 11 puntos ($LuzPuente/10$), donde cada tramo del puente compone una unidad de análisis y diseño. El punto 6 compone el tramo central o punto medio de la longitud del puente.



Figura 26. Interfaz de la programación en Maple de la discretización del puente

▼ Cálculo de coordenadas de análisis

```

<<<Parametros de entrada: >>>
↳ np      = Numero de puntos de discretización del puente (adimensional)
↳ LuzPuente = Luz de calculo entre ejes (m)

<<<Variable temporal: >>>
↳ Delta    = Longitud de cada tramo en el cual ha sido dividido el puente (m)



<<<Parametros de salida: >>>
↳ Coordenada = Vector de coordenads de los puntos de discretización a lo pargo de la longitud del puente (m)

<<<Proceso de evaluación: >>>
-----
> CoordenadaProc:=proc (np, LuzPuente, Coordenada)
>   local i,Delta:
>   Coordenada:=Vector (np,0.);
>   Delta:=LuzPuente/(np-1);
>   for i from 2 to np do
>     Coordenada[i]:= (i-1.) *Delta;
>   end do:
> end proc:
>

```

Tabla	
	1
1	0.
2	.8000000...
3	1.600000...
4	2.400000...
5	3.200000...
6	4.000000...
7	4.800000...
8	5.600000...
9	6.400000...
10	7.200000...
11	8.000000...

3.5.2. Declaración de Variables

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO			
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA			
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"			
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR			
FECHA:				
FORMATO N° 01: DECLARACIÓN DE VARIABLES				
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE GEOMETRÍA				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
1.10	AnchoTablero	8.40	m	Ancho de tablero
1.20	b	1.00	m	Ancho de franja de análisis y diseño
1.30	RecubPrincipal	2.50	cm	Recubrimiento de acero principal
1.40	DiamPrincipal	2.54	cm	Diámetro de acero principal
1.50	LuzPuente	variable	m	Luz del puente entre ejes de apoyo
1.60	EspesorAsfalto	5.00	cm	Espesor del asfalto
1.70	AnchoBarrera	0.40	m	Ancho de la base de la barrera
1.80	AnchoApoyo	0.30	m	Ancho del aparato de apoyo en direccion del eje del puente
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
2.10	fc	280.00	kgf/cm2	Resistencia a compresión del concreto
2.20	fy	4200.00	kgf/cm2	Límite de fluencia del acero de refuerzo
2.30	Es	2040000.00	kgf/cm2	Módulo de elasticidad del acero de refuerzo
2.40	Ec	256017.97	kgf/cm2	Módulo de elasticidad del concreto armado



DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
3.10	PEConcreto	2.4000	Tonf	Peso unitario del concreto armado
3.20	PEAcero	7.8500	Tonf	Peso unitario del acero de refuerzo
3.30	PEAsfalto	2.2000	Tonf	Peso unitario del asfalto
DECLARACIÓN DE LAS CARGAS PERMANENTES				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
4.10	PesoBarrera	0.6000	Tonf	Peso unitario de la barrera de protección
DECLARACIÓN DE LAS CARGAS VARIABLES				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
5.10	Wcarril	0.9540	Tonf	Carga viva distribuida de carril
5.20	Ptandem	11.3400	Tonf	Carga puntual del tren de cargas tandem
5.30	PCamion1	3.6300	Tonf	Carga puntual del tren de cargas camión, primer eje
5.40	PCamion23	14.5200	Tonf	Carga puntual del tren de cargas camión, segundo y tercer eje
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE DISEÑO				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
6.10	phiResist	1.00	m	Factor de resistencia
6.20	Einterno	variable	m	Ancho de franja crítico interno, inicial
6.30	Eexterno	variable	m	Ancho de franja externo, inicial
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE COSTOS				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
7.10	PUnitAcero	4.66	Soles/kg	Costo unitario del acero de refuerzo $f_y=4200\text{kg/cm}^2$
7.20	PUnitConcreto	457.93	Soles/m ³	Costo unitario del concreto $f'_c=280\text{kg/cm}^2$
7.30	PUnitEncofrado	59.50	Soles/m ²	Costo unitario del encofrado
DECLARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE DISCRETIZACIÓN				
ITEM	VARIABLE	VALOR	UND	DESCRIPCIÓN
8.10	np	11.00	-	Número de puntos a discretizar

3.6. Procedimientos de Análisis de Datos

Se muestra el procesamiento del estudio entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del manual de puentes MTC 2018.

3.6.1. Evaluación de Momentos Flectores

- a) **Procesamiento:** Se muestran las fórmulas matemáticas empleadas para determinar los momentos flectores de diseño por tipos de cargas (peso propio “MDC”, carga muerta “MDW” y carga viva “MLL”), la cual está compuesta por la combinación de carga vehicular tándem o camión, más la carga del carril de diseño; para un ancho de franja interna y externa o de borde, complementándose con las fórmulas descritas en el ítem 2.4.2. para los diferentes estados límites de resistencia, servicio y fatiga.

*Para el cálculo de los momentos flectores por peso propio (DC) se emplea la fórmula de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para el cálculo de los momentos flectores por peso barrera (DC-Barrera) se emplea la fórmula de la*

Figura 28, para el cálculo de los momentos flectores por peso de rodadura (DW) se emplea la



fórmula de la **Figura 29**, para el cálculo de los momentos flectores por carga carril (LL-Carril) se emplea la fórmula de la **Figura 30**, para el cálculo de los momentos flectores por carga tándem (LL-Tándem) se emplea la fórmula de la **Figura 31**, para el cálculo de los momentos flectores por carga camión (LL-Camión) se emplea la fórmula de la

Figura 32, para el cálculo de los momentos flectores último por estado límite de resistencia interna y externa se emplea las fórmulas de las

Figura 33 y

Figura 34 respectivamente, para el cálculo de los momentos flectores último por estado límite de servicio interno y externo se emplea las fórmulas de las

Figura 35 y

Figura 36 respectivamente y para el cálculo de los momentos flectores último por estado límite de fatiga interna se emplea la fórmula de la

Figura 37.

Figura 27. Algoritmo del momento flector por peso propio de la losa "DC"

- > $WDC = PE_{\text{Concreto}} * h / 100 * b$;
- > $MDC = (1/2) * WDC * x * (LuzPunto - x)$;

Figura 28. Algoritmo del momento flector por peso de la barrera "DC barrera"

- > $MDC_{\text{Barrera}} = (1/2) * \text{PesoBarrera} * x * (LuzPunto - x)$;

Figura 29. Algoritmo del momento flector por superficie de rodadura "DW"

- > $WDW = PE_{\text{Asfalto}} * \text{EspesorAsfalto} / 100 * b$;
- > $MDW = (1/2) * WDW * x * (LuzPunto - x)$;

Figura 30. Algoritmo del momento flector por carga distribuida "LL-Carril"

- > $MLL_{\text{Carril}} = W_{\text{carril}} * x * (LuzPunto - x) / 2$;

Figura 31. Algoritmo del momento flector por tándem de diseño "LL-Tándem"



```

>   ### Momento por tandem de diseño (LL) ###
>   y:=x*(LuzPuente-x)/LuzPuente:
>   ### Caso 1 ###
>   x1:=x-1.2:
>   y1:=max(x1/x*y,0):
>   ### Caso 2 ###
>   x2:=(LuzPuente-x)-1.2:
>   y2:=max(x2/(LuzPuente-x)*y,0):
>   ### Momento maximo ###
>   MLLTandem:=11.34*(y+max(y1,y2)):

```

Figura 32. Algoritmo del momento flector por camión de diseño "LL-Camión"

```

>   ### Momento para camion de diseño (LL) ###
>   y:=x*(LuzPuente-x)/LuzPuente:
>   x1:=x-4.27:
>   y1:=max(x1/x*y,0):
>   x2:=(LuzPuente-x)-4.27:
>   y2:=max(x2/(LuzPuente-x)*y,0):
>   ### Momento maximo ###
>   MLLCamion:=14.52*y+14.52*max(y1,y2)+3.63*min(y1,y2):

```

Figura 33. Algoritmo del momento flector por Estado Límite Resistencia (Interno)

```

>   MUResistenciaInterno := 1.25*MDC+1.50*MDW+1.75*(MLLCarril+1.33*max(MLLTandem, MLLCamion))/E;

```

Figura 34. Algoritmo del momento flector por Estado Límite Resistencia (Borde)

```

>   MUResistenciaExterno := 1.25*MDC+1.25*MDCBarrera/E+1.50*MDW*(E-AnchoBarrera)/E+1.75*(MLLCarril*(E-AnchoBarrera)
/3+0.5*1.33*max(MLLTandem, MLLCamion))/E;

```

Figura 35. Algoritmo del momento flector por Estado límite Servicio (Interno)

```

>   MUServicioInterno := MDC+MDW+(MLLCarril+1.33*max(MLLTandem, MLLCamion))/E;

```

Figura 36. Algoritmo del momento flector por Estado límite Servicio (Borde)

```

>   MUServicioExterno := MDC+MDCBarrera/E+MDW*(E-AnchoBarrera)/E+(MLLCarril*(E-AnchoBarrera)/3+0.5*1.33*max(MLLTandem,
MLLCamion))/E;

```

Figura 37. Algoritmo del momento flector por Estado límite Fatiga (Interno)

```

>   MUFatiga := 1.50*1.15*MLLCamion/E;

```

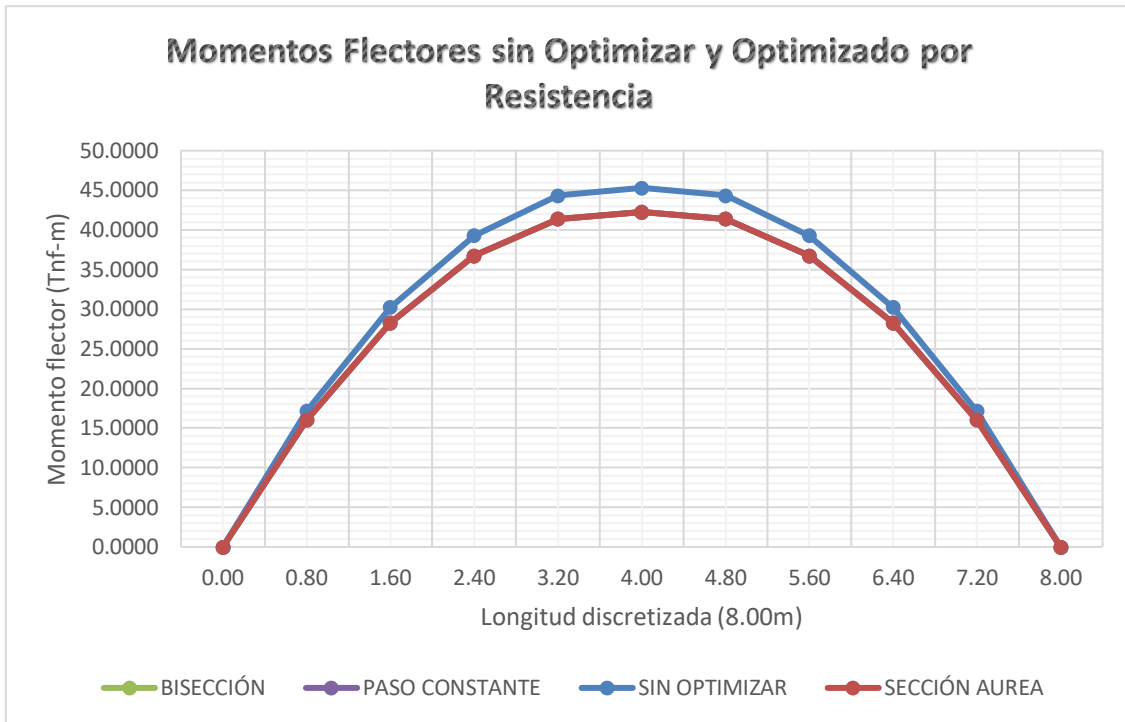


En las **Tabla 14**, **Tabla 15** y **Nota**: Esta tabla muestra los momentos flectores discretizados interno y externo para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, para el estado límite de servicio I.

b) **Tabla 16** se registran los datos utilizando las fórmulas expuestas en el apartado a), en ella se muestran los momentos flectores últimos de diseño discretizados sin optimizar y optimizados para franjas internas y de borde, para los estados límites de resistencia, servicio y fatiga de acuerdo a las especificaciones del ítem 2.4.2. Se ha tomado como referencia la recopilación de momentos flectores para un puente con longitud de 8.00m. Asimismo también se puede observar la optimización de los momentos flectores por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea (para los estados límites de resistencia, servicio y fatiga).

Tabla 14. Evaluación de momentos flectores por estado límite de resistencia

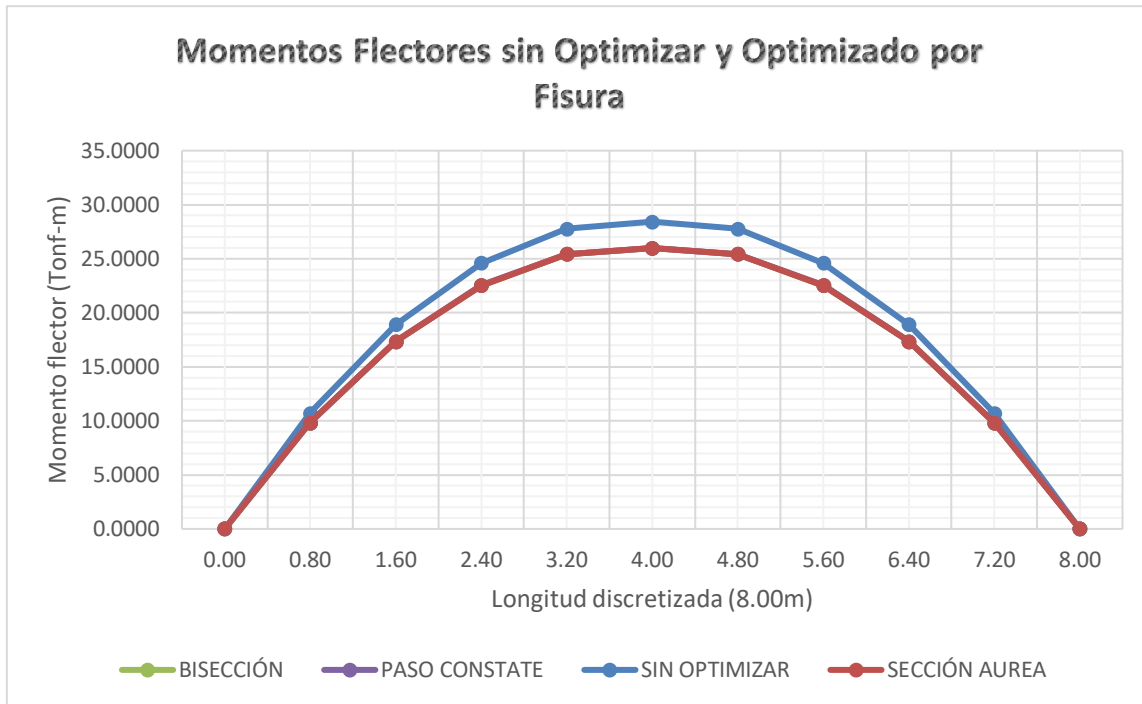
ITEM		Luz = 8.00m		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
						PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
				Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m
1.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.80	17.1341	18.6258	16.0389	17.5285	16.0340	17.5235	16.0340	17.5235	16.0340	17.5235
3.00	1.60	30.2323	32.8732	28.2854	30.9225	28.2766	30.9137	28.2766	30.9137	28.2766	30.9137
4.00	2.40	39.2948	42.7423	36.7394	40.1821	36.7279	40.1705	36.7279	40.1705	36.7279	40.1705
5.00	3.20	44.3214	48.2332	41.4010	45.3071	41.3878	45.2939	41.3878	45.2939	41.3878	45.2939
6.00	4.00	45.3122	49.3457	42.2701	46.2978	42.2564	46.2840	42.2564	46.2840	42.2564	46.2840
7.00	4.80	44.3214	48.2332	41.4010	45.3071	41.3878	45.2939	41.3878	45.2939	41.3878	45.2939
8.00	5.60	39.2948	42.7423	36.7394	40.1821	36.7279	40.1705	36.7279	40.1705	36.7279	40.1705
9.00	6.40	30.2323	32.8732	28.2854	30.9225	28.2766	30.9137	28.2766	30.9137	28.2766	30.9137
10.00	7.20	17.1341	18.6258	16.0389	17.5285	16.0340	17.5235	16.0340	17.5235	16.0340	17.5235
11.00	8.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Nota: Esta tabla muestra los momentos flectores discretizados interno y externo para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, para el estado límite de resistencia I.

Tabla 15. Evaluación de momentos flectores por estado límite de servicio

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL								
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"								
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR								
FECHA:									
FORMATO N° 03: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES EN EL ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO									
EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES POR FISURA (Tonf-m)									
ITEM	Luz = 8.00m	VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
				PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
		Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m
1.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.80	10.7051	11.8808	9.8283	11.0025	9.8243	10.9986	9.8243	10.9986
3.00	1.60	18.9008	20.9847	17.3421	19.4233	17.3350	19.4163	17.3350	19.4163
4.00	2.40	24.5873	27.3118	22.5414	25.2624	22.5321	25.2532	22.5321	25.2532
5.00	3.20	27.7644	30.8619	25.4262	28.5198	25.4156	28.5092	25.4156	28.5092
6.00	4.00	28.4321	31.6351	25.9965	29.1954	25.9855	29.1844	25.9855	29.1844
7.00	4.80	27.7644	30.8619	25.4262	28.5198	25.4156	28.5092	25.4156	28.5092
8.00	5.60	24.5873	27.3118	22.5414	25.2624	22.5321	25.2532	22.5321	25.2532
9.00	6.40	18.9008	20.9847	17.3421	19.4233	17.3350	19.4163	17.3350	19.4163
10.00	7.20	10.7051	11.8808	9.8283	11.0025	9.8243	10.9986	9.8243	10.9986
11.00	8.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Nota: Esta tabla muestra los momentos flectores discretizados interno y externo para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, para el estado límite de servicio I.

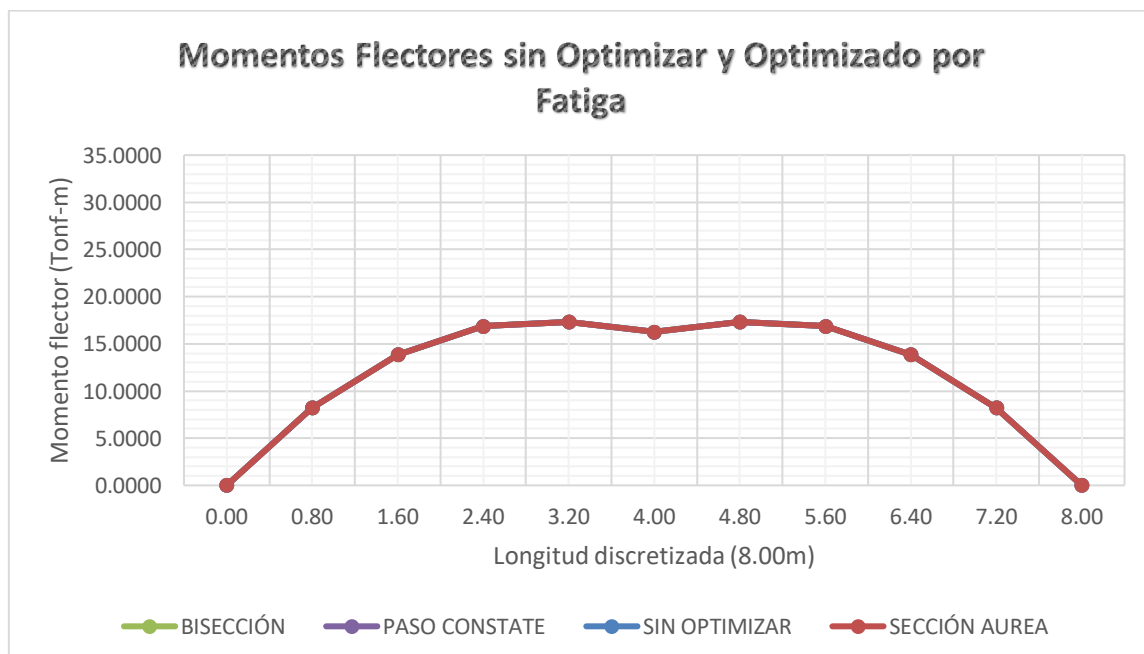
Tabla 16. Evaluación de momentos flectores por estado límite de fatiga



 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N° 04: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES EN EL ESTADOS LÍMITE DE FATIGA

EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES POR FATIGA (Tonf-m)									
ITEM	Luz = 8.00m	VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
		Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
				Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno Tnf-m	Momento Externo Tnf-m
1.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.80	8.2280	4.1140	8.2280	4.1140	8.2280	4.1140	8.2280	4.1140
3.00	1.60	13.8568	6.9284	13.8568	6.9284	13.8568	6.9284	13.8568	6.9284
4.00	2.40	16.8864	8.4432	16.8864	8.4432	16.8864	8.4432	16.8864	8.4432
5.00	3.20	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584
6.00	4.00	16.2447	8.1224	16.2447	8.1224	16.2447	8.1224	16.2447	8.1224
7.00	4.80	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584
8.00	5.60	16.8864	8.4432	16.8864	8.4432	16.8864	8.4432	16.8864	8.4432
9.00	6.40	13.8568	6.9284	13.8568	6.9284	13.8568	6.9284	13.8568	6.9284
10.00	7.20	8.2280	4.1140	8.2280	4.1140	8.2280	4.1140	8.2280	4.1140
11.00	8.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Nota: Esta tabla muestra los momentos flectores discretizados interno y externo para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, para el estado límite de fatiga I.

Tabla 17. Momentos flectores máximos discretizados por varios estados límites



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

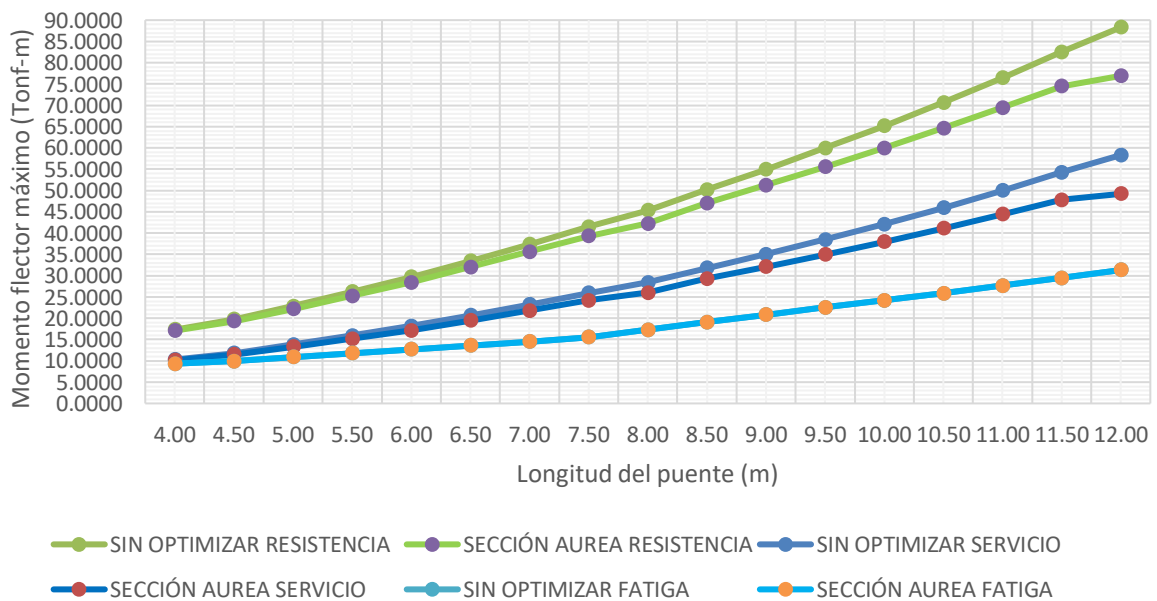


TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR
FECHA:	

FORMATO N° 05: EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS DISCRETIZADOS POR VARIOS ESTADOS LÍMITE

EVALUACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS DISCRETIZADOS POR VARIOS ESTADOS LÍMITES													
ITEM	LONG PUENTE (m)	MOMENTOS POR RESISTENCIA				MOMENTOS POR SERVICIO				MOMENTOS POR FATIGA			
		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS - SECCIÓN AUREA		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS - SECCIÓN AUREA		VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS - SECCIÓN AUREA	
		Momento Interno m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno m	Momento Externo Tnf-m	Momento Interno m	Momento Externo Tnf-m
1.00	4.00	17.3197	17.8529	17.0903	17.6236	10.3041	10.8448	10.1207	10.6614	9.3301	4.6650	9.3301	4.6650
2.00	4.50	19.7281	20.5323	19.3039	20.1081	11.8226	12.5668	11.4832	12.2275	9.9490	4.9745	9.9490	4.9745
3.00	5.00	22.8256	24.0038	22.1653	23.3435	13.7934	14.8300	13.2652	14.3017	10.8798	5.4399	10.8798	5.4399
4.00	5.50	26.1988	27.7501	25.2608	26.8121	15.9314	17.2545	15.1810	16.5041	11.8120	5.9060	11.8120	5.9060
5.00	6.00	29.7194	31.6861	28.4239	30.3906	18.1888	19.8290	17.1525	18.7927	12.7275	6.3637	12.7275	6.3637
6.00	6.50	33.4077	35.8291	32.0383	34.4669	20.6634	22.6541	19.4884	21.4790	13.6275	6.8138	13.6275	6.8138
7.00	7.00	37.3892	40.3149	35.5900	38.5157	23.2115	25.5785	21.7721	24.1391	14.5132	7.2566	14.5132	7.2566
8.00	7.50	41.4634	44.9251	39.2881	42.7498	25.9132	28.6850	24.1730	26.9447	15.5248	7.7624	15.5248	7.7624
9.00	8.00	45.3122	49.3457	42.2564	46.2840	28.4321	31.6351	25.9855	29.1844	17.3169	8.6584	17.3169	8.6584
10.00	8.50	50.2414	54.8888	47.0805	51.7279	31.8187	35.4831	29.2900	32.9544	19.0789	9.5395	19.0789	9.5395
11.00	9.00	54.9713	60.2671	51.2377	56.5335	35.0427	39.1942	32.0559	36.2073	20.8129	10.4064	20.8129	10.4064
12.00	9.50	59.9456	65.9260	55.5388	61.5193	38.4609	43.1261	34.9355	39.6007	22.5204	11.2602	22.5204	11.2602
13.00	10.00	65.1768	71.8778	59.9815	66.6825	42.0832	47.2886	37.9269	43.1323	24.2030	12.1015	24.2030	12.1015
14.00	10.50	70.6776	78.1347	64.6483	72.1054	45.9194	51.6910	41.0959	46.8676	25.8622	12.9311	25.8622	12.9311
15.00	11.00	76.4604	84.7088	69.4650	77.7134	49.9793	56.3432	44.3831	50.7469	27.6491	13.8245	27.6491	13.8245
16.00	11.50	82.5375	91.6121	74.4786	83.5531	54.2727	61.2544	47.8256	54.8072	29.4927	14.7463	29.4927	14.7463
17.00	12.00	88.3139	98.2315	76.9283	86.8459	58.3144	65.9276	49.2059	56.8191	31.3126	15.6563	31.3126	15.6563

Momentos Flectores máximos discretizados por varios Estados Límite - Sección Aurea





Nota: Esta tabla muestra los momentos flectores máximos discretizados interno y externo para una longitud de entre 4.00 y 12.00m, sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea, para los estados límites de resistencia I, servicio I y fatiga I.

c) **Análisis de la prueba:** De acuerdo a la **Tabla 14** los valores de los momentos flectores por resistencia internos y de borde sin optimizar son mayores respecto a los métodos optimizados en cada tramo de la longitud del puente, teniendo al método de la sección aurea como el que mejor optimiza (valor mínimo).

De acuerdo a la **Tabla 15**, los valores de los momentos flectores por servicio internos y de borde sin optimizar son mayores respecto a los métodos optimizados en cada tramo para una longitud del puente de 8.00m, teniendo al método de la sección aurea como el que mejor optimiza (valor mínimo).

De acuerdo a la *Nota:* Esta tabla muestra los momentos flectores discretizados interno y externo para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, para el estado límite de servicio I.

Tabla 16, los valores de los momentos flectores por fatiga internos y de borde sin optimizar son iguales respecto a los métodos optimizados en cada tramo de la longitud del puente, no teniendo algún método como el que mejor optimice.

De acuerdo a la **Tabla 17**, los valores de los momentos flectores máximos discretizados por los diferentes estados límites de resistencia, servicio y fatiga para franjas internas y de borde sin optimizar siempre son mayores respecto a los optimizados (por sección aurea) para longitudes comprendidas entre 4.00m y 8.00m.

3.6.2. Evaluación de Fuerzas Cortantes en Estado Límite de Resistencia

a) **Procesamiento:** Se muestran las fórmulas matemáticas empleadas para determinar las fuerzas cortantes de diseño por tipos de cargas (peso propio “VDC”, carga muerta “VDW” y por carga viva “VLL”), la cual está compuesta por la combinación de carga vehicular tándem o camión, más la carga del carril de diseño; complementándose con lo especificado en el ítem 2.4.1., para el estado límite de resistencia

Para el cálculo de las fuerzas cortantes por superficie de rodadura (VDW) se emplea la fórmula de la figura 38, para el cálculo de las fuerzas cortantes por carga muerta (VDC) se emplea la fórmula de la **Figura 39**, para el cálculo de las fuerzas cortantes por carga barrera (VDC-Barrera) se emplea la fórmula de la **Figura 40**, para el cálculo



de las fuerzas cortantes por carga de carril (VLL-Carril) se emplea la fórmula de la **Figura 41**, para el cálculo de las fuerzas cortantes por carga tándem (VLL-Tándem) se emplea la fórmula de la **Figura 42**, para el cálculo de las fuerzas cortantes por carga camión (VLL-Camión) se emplea la fórmula de la **Figura 43**, para el cálculo de las fuerzas cortantes ultima interna se emplea la fórmula de la **Figura 44** y para el cálculo de las fuerzas cortantes ultima externa o de borde se emplea la fórmula de la **Figura 45**.

Figura 38. Algoritmo de fuerza cortante por superficie de rodadura "VDW"

```
> WDW:=PEAsfalto*EspesorAsfalto/100*b;  
> VDW:=WDW*LuzPuente/2-WDW*x;
```

Figura 39. Algoritmo de fuerza cortante por carga muerta "VDC"

```
> WDC:=PEConcreto*h/100*b;  
> VDC:=WDC*LuzPuente/2-WDC*x;
```

Figura 40. Algoritmo de fuerza cortante por barrera de seguridad "VDC-Barrera"

```
> VDCBarrera:=PesoBarrera*LuzPuente/2-PesoBarrera*x;
```

Figura 41. Algoritmo de fuerza Cortante por carga distribuida "VLL-Carril"

```
> VLLCarril:=Wcarril*LuzPuente/2-Wcarril*x;
```

Figura 42. Algoritmo de fuerza cortante por tándem de diseño "VLL-Tándem"

```
> ### Caso único: Tren de cargas ubicado al lado derecho  
> x1:=LuzPuente-x;  
> y:=(LuzPuente-x)/LuzPuente;  
> y1:=y;  
> x2:=LuzPuente-x-1.2;  
> y2:=x2/x1*y1;  
> ### Cortante máxima  
> VLLTandem:=11.34*(y1+max(y2,0));
```

Figura 43. Algoritmo de fuerza cortante por camión de diseño "VLL-Camión"



```
> ### Cortante para camión de diseño (LL)
> x1:=LuzPuente-x;
> y:=(LuzPuente-x)/LuzPuente;
> y1:=y;
> x2:=x1-4.27;
> y2:=x2/x1*y1;
> x3:=x2-4.27;
> y3:=x3/x1*y1;
> ### Cortante máxima
> VLLCamion:=14.52*y1+14.52*max(y2,0)+3.63*max(y3,0);
```

Figura 44. Algoritmo de fuerza cortante por Estado Límite Resistencia (Interno)

```
> VUResistenciaInterno := 1.25*VDC+.50*VDW+1.75*(VLLCarril+1.33*max(VLLTandem,VLLCamion))/E;
```

Figura 45. Algoritmo de fuerza cortante por Estado Límite Resistencia (Borde)


```
> VUResistenciaExterno := 1.25*VDC+1.25*VDCBarrera/E+1.50*VDW*(E-AnchoBarrera)/E+1.75*(VLLCarril*(E-AnchoBarrera)
/3+0.5*1.33*max(VLLTandem,VLLCamion))/E;
```

- b) En la **Tabla 18** se registran los datos utilizando las fórmulas expuestas en el apartado a), en ella se muestran las fuerzas cortantes últimas de diseño sin optimizar y optimizados para franjas internas y de borde para una sección crítica, por el estado límite de resistencia de acuerdo a las especificaciones del ítem 2.4.1. Se ha tomado como referencia la recopilación de fuerzas cortantes para puentes con longitudes de entre 4.00m y 8.00m. Asimismo también se puede observar la optimización de las fuerzas cortantes por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, y las deflexiones máximas permitidas por longitud del puente.



Tabla 18. *Evaluación de fuerzas cortantes máximas por estado límite resistencia*



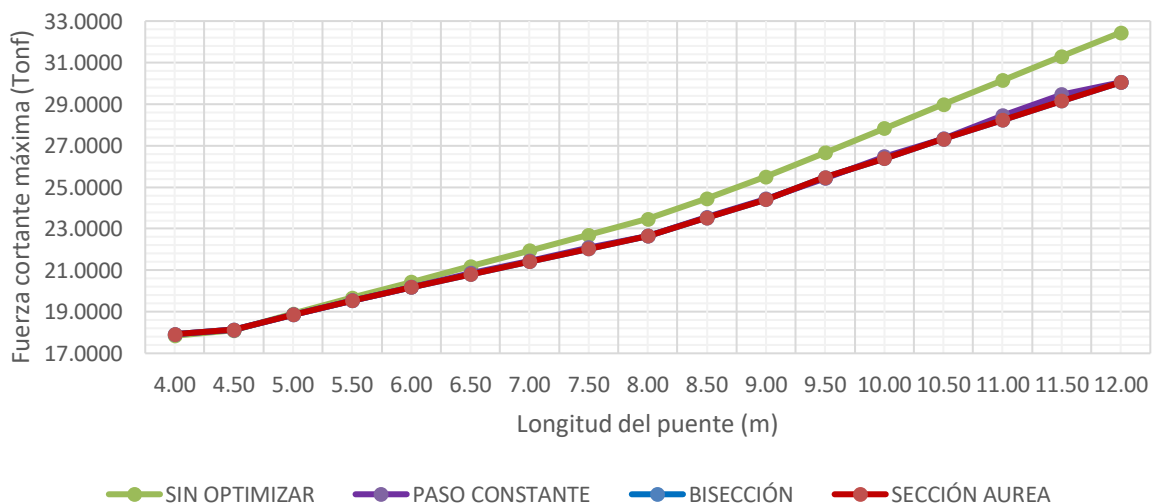
	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N° 10: EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES MÁXIMAS Y DEFLEXIONES

EVALUACIÓN DE FUERZAS CORTANTES MÁXIMAS POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

ITEM	LONG PUENTE (m)	VALORES SIN OPTIMIZAR		VALORES OPTIMIZADOS					
		Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)	PASO CONSTANTE		BISECCIÓN		SECCIÓN AUREA	
				Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)	Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)	Deflexión Max (m)	Cortante Max (Tonf)
1.00	4.00	0.0021	17.8472	0.0034	17.9223	0.0034	17.9223	0.0034	17.9223
2.00	4.50	0.0024	18.1086	0.0045	18.1331	0.0045	18.1331	0.0045	18.1331
3.00	5.00	0.0027	18.9029	0.0057	18.8556	0.0057	18.8556	0.0057	18.8556
4.00	5.50	0.0031	19.6787	0.0069	19.5398	0.0069	19.5398	0.0069	19.5398
5.00	6.00	0.0034	20.4371	0.0083	20.1848	0.0083	20.1848	0.0083	20.1848
6.00	6.50	0.0036	21.1892	0.0082	20.8691	0.0098	20.8032	0.0098	20.8032
7.00	7.00	0.0039	21.9429	0.0103	21.4519	0.0111	21.4169	0.0111	21.4169
8.00	7.50	0.0042	22.7038	0.0107	22.1003	0.0121	22.0334	0.0121	22.0334
9.00	8.00	0.0044	23.4761	0.0131	22.6458	0.0131	22.6464	0.0131	22.6464
10.00	8.50	0.0046	24.4508	0.0136	23.5616	0.0141	23.5356	0.0141	23.5356
11.00	9.00	0.0048	25.5090	0.0147	24.4384	0.0151	24.4173	0.0151	24.4173
12.00	9.50	0.0050	26.6605	0.0158	25.4313	0.0151	25.4724	0.0151	25.4724
13.00	10.00	0.0051	27.8337	0.0155	26.4801	0.0170	26.3792	0.0170	26.3792
14.00	10.50	0.0053	28.9940	0.0176	27.3427	0.0179	27.3209	0.0179	27.3209
15.00	11.00	0.0055	30.1471	0.0161	28.4465	0.0188	28.2408	0.0188	28.2408
16.00	11.50	0.0056	31.2978	0.0158	29.4714	0.0196	29.1518	0.0196	29.1518
17.00	12.00	0.0058	32.4501	0.0206	30.0520	0.0206	30.0511	0.0206	30.0511

Fuerzas cortantes máximas discretizadas sin optimizar y optimizado por Resistencia



Nota: Esta tabla muestra las fuerzas cortantes máximas discretizadas y deflexiones máximas permitidas para longitudes de entre 4.00 y 12.00m, sin optimizar y optimizados por los métodos del paso constante, bisección y sección aurea, para el estado límite de resistencia I.



- c) **Análisis de la prueba:** De acuerdo a la **Tabla 18**, se observa que los valores de las fuerzas cortantes últimas por resistencia sin optimizar siempre son mayores respecto a los métodos optimizados para longitudes de entre 4.00m y 8.00m; de la comparación de las fuerzas cortantes optimizadas el método que mejor optimiza (valor mínimo) es la sección aurea. Para las deflexiones ocurre todo lo contrario, los valores optimizados son mayores respecto a los sin optimizar, esto debido a que al optimizar el peralte (disminuir el peralte) la deflexión aumenta, ya que tienen un comportamiento inversamente proporcional.

3.6.3. Evaluación del Acero de Refuerzo

- a) **Procesamiento:** Se muestran las fórmulas matemáticas empleadas para determinar la cantidad del área de acero de refuerzo para una franja interna y de borde de un diseño sin optimizar y optimizado (por los métodos paso constante, bisección y sección aurea), para cada punto discretizado longitudinalmente, tomándose en cuenta lo especificado en los ítems 2.4.3, 2.4.4 y 2.4.5., para los diferentes estados límites de resistencia, servicio y fatiga.

Para el cálculo del área de acero principal, de distribución y temperatura por el estado límite de resistencia se emplea la fórmula de la **Figura 46**, para el cálculo del área de acero principal, de distribución y temperatura por el estado límite de servicio se emplea la fórmula de la **Figura 47** y para el cálculo del área de acero principal, de distribución y temperatura por el estado límite de servicio se emplea la fórmula de la **Figura 48**.

Figura 46. Algoritmo del área de acero por Estado límite de Resistencia

```
> d:=h-RecubPrincipal-DiamPrincipal/2;
> ### Área de acero por temperatura ###
> AsTemperatura:=((0.18*AnchoTablero*100*h)/(2*(AnchoTablero*100+h)));
> ### Área de acero mínima ###
> fr:=evalf(2.01*sqrt(fc));
> Sc:=evalf(b*100*(h^2)/6);
> Mcr:=evalf(1.1*fr*Sc/100000);
> Mdis:=max(Mu,min((1.33*Mu),Mcr));
> ### Área de acero principal ###
> AsPrin:=(2*(.85*.9)*fy*d*fc*b*100-sqrt((-2*(.85*.9)*fy*d*fc*b*100)^2-(2*(4*.9)*fy^2*Mdis*10^5*.85):
(2*.9)*fy^2);
> AsPrincipal:=max(AsPrin,AsTemperatura);
> ### Área de acero de distribución ###
> AsDist:=evalf(min((0.55/sqrt(LuzPuente)),0.50)*AsPrincipal);
> AsDistribucion:=max(AsDist,AsTemperatura);
```



Figura 47. Algoritmo del área de acero por Estado límite de Servicio

```
> n := evalf(Es/Ec);
> d0 := RecubPrincipal+(1/2)*DiamPrincipal;
> d := h-RecubPrincipal-(1/2)*DiamPrincipal;
> fRatio:=2:
> Ast:=As0:
> for j from As0 by DeltaAs while fRatio > 1 do;
>   y:=evalf((-2*n*Ast+sqrt((2*n*Ast)^2+8*n*b*100*Ast*d))/(2*b*100));
>   jd := d-(1/3)*y;
>   fss:=Ms*10^5/(jd*Ast);
>   fRatio := fss/(.6*fy);
>   Ast:=Ast+DeltaAs;
> end do:
> AsPrincipal:=Ast:
> AsDistribucion:=evalf(min(0.55/sqrt(LuzPuente),0.50)*AsPrincipal):
> AsTemperatura:=((0.18*AnchoTablero*100*h)/(2*(AnchoTablero*100+h))):
```



Figura 48. Algoritmo del área de Acero por Estado límite de Fatiga

```
> n := evalf(Es/Ec);
> d0 := RecubPrincipal+(1/2)*DiamPrincipal;
> d := h-RecubPrincipal-(1/2)*DiamPrincipal;
> fRatio:=2:
> Ast:=As0:
> for j from As0 by DeltaAs while fRatio > 1 do;
>   y:=evalf((-2*n*Ast+sqrt((2*n*Ast)^2+8*n*b*100*Ast*d))/(2*b*100));
>   jd := d-(1/3)*y;
>   fLL:=Mfatiga*10^5/(Ast*jd);
>   fDL:=Mpermanente*10^5/(Ast*jd);
>   fmin:=0+fDL;
>   fmax:=fLL+fDL;
>   f:=fmax-fmin;
>   flim:=max((1687-0.33*fmin),1);
>   fRatio:=f/flim;
>   Ast:=Ast+DeltaAs;
> end do:
> AsPrincipal:=Ast-DeltaAs;
> ### Área de acero de distribución ###
> AsDistribucion:=evalf(min(0.55/sqrt(LuzPuente),0.50)*AsPrincipal):
> ### Área de acero por temperatura ###
> AsTemperatura:=((0.18*AnchoTablero*100*h)/(2*(AnchoTablero*100+h))):
```

b) En las **Tabla 19** y **Tabla 20** se muestran los datos en cada punto discretizado del área de acero de refuerzo principal, de distribución y temperatura, sin optimizar y optimizados (por el método de paso constante, bisección y sección aurea) para franjas internas y de borde, para el estado límite de resistencia, servicio y fatiga. Se ha tomado como referencia la recopilación de áreas de acero para un puente de 8.00 m. asimismo también se observa la optimización de las áreas de acero por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea.

Tabla 19. Acero de refuerzo sin optimizar y optimizado (método paso constante)



 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		



FORMATO N° 11: EVALUACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO POR MÁXIMO ESTADO LÍMITE (RESISTENCIA, SERVICIO Y FATIGA), SIN OPTIMIZAR Y OPTIMIZADO

EVALUACIÓN DEL ACERO POR EL MÁXIMO ESTADO LÍMITE (RESISTENCIA, SERVICIO Y FATIGA), SIN OPTIMIZAR Y OPTIMIZADO POR PASO CONSTANTE

ITEM	Luz = 8.00m	VALORES SIN OPTIMIZAR						VALORES OPTIMIZADOS POR PASO CONSTANTE					
		AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA		AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA	
		As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)
1.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.80	11.5604	12.5962	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	23.0000	18.3942	4.4725	3.5196	2.6488	2.6488
3.00	1.60	20.8325	22.7527	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	39.0000	34.3802	7.5837	6.3587	2.6488	2.6488
4.00	2.40	27.4985	30.0934	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	49.0000	46.8483	9.5283	8.3810	2.6488	2.6488
5.00	3.20	31.2933	34.2979	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	51.0000	54.4327	9.9172	9.5283	2.6488	2.6488
6.00	4.00	32.0500	35.1610	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	49.8253	55.9628	9.3338	9.7616	2.6488	2.6488
7.00	4.80	31.2933	34.2979	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	51.0000	54.4327	9.9172	9.5283	2.6488	2.6488
8.00	5.60	27.4985	30.0934	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	49.0000	46.8483	9.5283	8.3810	2.6488	2.6488
9.00	6.40	20.8325	22.7527	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	39.0000	34.3802	7.5837	6.3587	2.6488	2.6488
10.00	7.20	11.5604	12.5962	3.7629	3.7629	3.7629	3.7629	23.0000	18.3942	4.4725	3.5196	2.6488	2.6488
11.00	8.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Nota: Esta tabla muestra los aceros de refuerzo máximos discretizados por el máximo estado límite (resistencia I, servicio I o fatiga I) interno y externo para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por el método del paso constante.

Tabla 20. Acero de refuerzo optimizado por los métodos bisección y sección aurea

 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"	
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR	
FECHA:		

FORMATO N° 12: EVALUACIÓN DEL ACERO POR MÁXIMO ESTADO LÍMITE (RESISTENCIA, SERVICIO Y FATIGA), OPTIMIZADO (BISECCION Y SECCION AUREA)

EVALUACIÓN DEL ACERO POR EL MÁXIMO ESTADO LÍMITE (RESISTENCIA, SERVICIO Y FATIGA), OPTIMIZADO POR BISECCIÓN Y SECCIÓN AUREA

ITEM	Luz = 8.00m	VALORES OPTIMIZADOS POR BISECCIÓN						VALORES OPTIMIZADOS POR SECCIÓN AUREA					
		AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA		AS PRINCIPAL		AS DISTRIBUCIÓN		AS TEMPERATURA	
		As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)	As-Interno (cm2)	As-Externo (cm2)
1.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.80	23.0000	18.4348	4.4725	3.5196	2.6525	2.6525	23.0000	18.3877	4.4725	3.5196	2.6496	2.6496
3.00	1.60	39.0000	34.4588	7.5837	6.3587	2.6525	2.6525	39.0000	34.3664	7.5837	6.3587	2.6496	2.6496
4.00	2.40	49.0000	46.9596	9.5283	8.4004	2.6525	2.6525	49.0000	46.8270	9.5283	8.3810	2.6496	2.6496
5.00	3.20	51.0000	54.5675	9.9172	9.5477	2.6525	2.6525	51.0000	54.4060	9.9172	9.5283	2.6496	2.6496
6.00	4.00	49.9882	56.1075	9.3338	9.7811	2.6525	2.6525	49.8024	55.9351	9.3338	9.7616	2.6496	2.6496
7.00	4.80	51.0000	54.5675	9.9172	9.5477	2.6525	2.6525	51.0000	54.4060	9.9172	9.5283	2.6496	2.6496
8.00	5.60	49.0000	46.9596	9.5283	8.4004	2.6525	2.6525	49.0000	46.8270	9.5283	8.3810	2.6496	2.6496
9.00	6.40	39.0000	34.4588	7.5837	6.3587	2.6525	2.6525	39.0000	34.3664	7.5837	6.3587	2.6496	2.6496
10.00	7.20	23.0000	18.4348	4.4725	3.5196	2.6525	2.6525	23.0000	18.3877	4.4725	3.5196	2.6496	2.6496
11.00	8.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000



Nota: Esta tabla muestra los aceros de refuerzo máximos discretizados por el máximo estado límite (resistencia I, servicio I o fatiga I) interno y externo para una longitud de 8.00m, optimizados por los métodos de bisección y sección aurea.

- c) **Análisis de la prueba:** De acuerdo a la **Tabla 19**, los valores de las áreas de acero principal, de distribución y temperatura, toman el máximo valor de entre los estados límites de resistencia, servicio y fatiga para franjas internas y de borde. También se observa que los valores del diseño sin optimizar son menores respecto a los valores por el método optimizado del paso constante para cada punto discretizado de un puente de 8.00 m.

De acuerdo a la **Tabla 20**, los valores de las áreas de acero principal, de distribución y temperatura, toman el máximo valor de entre los estados límites de resistencia, servicio y fatiga (internos y de borde). También se observa que los valores del diseño por los métodos optimizados de bisección y sección aurea tienen similares valores para cada punto discretizado para un puente de 8.00 m. por tanto de las **Tabla 19** y **Tabla 20** se tiene que los métodos de bisección y sección aurea convergen rápidamente en un menor número de iteraciones.

3.6.4. Evaluación de Peraltes

- a) **Procesamiento:** Se muestran las fórmulas matemáticas empleadas para determinar los peraltes de un diseño sin optimizar y optimizado (por los métodos paso constante, bisección y sección aurea), complementándose con lo especificado en los ítems 2.3.9 y 2.5.6.

Para el cálculo del peralte sin optimización se emplea la fórmula de la **Figura 49**, para el peralte por resistencia se emplea la fórmula de la **Figura 50**, para el peralte por servicio se emplea la fórmula de la **Figura 51**, para el peralte por fatiga se emplea la fórmula de la **Figura 52** y para el peralte por fuerza cortante se emplea la fórmula de la **Figura 53**.

Figura 49. Algoritmo del peralte sin optimización o por predimensionamiento

$$> \text{hhh} = 1.2 * (\text{LuzPuente} + 3) / 30 * 100;$$



Figura 50. Algoritmo de optimización del peralte por estado límite resistencia

```
> FuncionCosto:=CostoResistenciaProc:
> if Metodo=1 then
>   OptimizaPasoConstante(1000,hinicialmax,-0.1,'h1','Costo1'):
> elif Metodo=2 then
>   OptimizaBiseccion(1000,0.1,hinicialmin,hinicialmax,'h1','Costo1'):
> elif Metodo=3 then
>   OptimizaProporcionAurea(1000,0.1,hinicialmin,hinicialmax,'h1','Costo1'):
> end if:   print(h1,Costo1);
```

Figura 51. Algoritmo de optimización del peralte por estado límite servicio

```
> FuncionCosto:=CostoServicioProc:
> if Metodo=1 then
>   OptimizaPasoConstante(1000,hinicialmax,-0.1,'h2','Costo2'):
> elif Metodo=2 then
>   OptimizaBiseccion(1000,0.1,hinicialmin,hinicialmax,'h2','Costo2'):
> elif Metodo=3 then
>   OptimizaProporcionAurea(1000,0.1,hinicialmin,hinicialmax,'h2','Costo2'):
> end if:   print(h2,Costo2);
```

Figura 52. Algoritmo de optimización del peralte por estado límite fatiga

```
> FuncionCosto:=CostoFatigaProc:
> if Metodo=1 then
>   OptimizaPasoConstante(100,hinicialmax,-1,'h3','Costo3'):
> elif Metodo=2 then
>   OptimizaBiseccion(100,0.1,hinicialmin,hinicialmax,'h3','Costo3'):
> elif Metodo=3 then
>   OptimizaProporcionAurea(100,0.1,hinicialmin,hinicialmax,'h3','Costo3'):
```

Figura 53. Algoritmo de optimización del peralte por fuerzas cortantes

```
> fh := Vr-VU:
> h1:=h0:
> for i from h0 by -Delta while fh > 0 do;
>   h1:=h1-Delta:
>   CortanteResistenteProc(h1,'Vr');
>   CortantePuntoCriticoProc(h1,'VU');
>   fh := Vr-VU;
> end do:
> h:=h1+Delta;
> CostoResistenciaProc(h1+Delta,'costo'):
```



- b) En las **Tabla 21**, **Tabla 22** y **Tabla 23** se registran los datos utilizando las fórmulas expuestas en el apartado **a)**, en ella se muestran los peraltes calculados sin optimizar y optimizados para los diferentes estados límites de resistencia, servicio, fatiga y por fuerzas cortantes; en esencia lo que realizan estos algoritmos son buscar peraltes



mínimos a través de la optimización por los métodos de paso constante, bisección y sección aurea, que cumplan las verificaciones de diseño propuestas en el ítem 2.4. una vez determinado el peralte óptimo este pasará a evaluarse en los diferentes estados limites (resistencia, servicio y fatiga) y fuerzas cortantes, de modo que cada limite tenga un peralte mínimo específico. Así se tendrán los peraltes por resistencia, servicio, fatiga y fuerzas cortantes.



Para la elección del peralte óptimo se toma el máximo valor de entre estas 4 verificaciones (por resistencia, por servicio, por fatiga y por fuerzas cortantes), ya que, al elegir el mayor valor, esta cumplirá las verificaciones de diseño hechas para peraltes menores. Se ha tomado como ejemplo un puente con longitud de 8.00m.

Tabla 21. Evaluación de los peraltes por optimización del método paso constante

 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL 								
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"							
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR							
FECHA:								
FORMATO N° 13: OPTIMIZACIÓN DE LOS PERALTES POR EL MÉTODO PASO CONSTANTE								
DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE PERALTE (cm)								
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE OPTIMIZADO POR PASO CONSTANTE					PERALTE ÓPTIMO (cm)
			POR RESISTENCIA (cm)	POR SERVICIO (cm)	POR FATIGA (cm)	POR FUERZA CORTANTE (cm)		
9.00	8.00	44.00	30.50	30.40	30.00	29.30	30.50	


Nota: Esta tabla muestra el peralte óptimo de la losa y la verificación de dichos peraltes por resistencia I, servicio I, fatiga I y fuerza cortante para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por el método del paso constante.

Tabla 22. Evaluación de los peraltes por optimización del método de bisección

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO						
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA						
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"							
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR							
FECHA:								
FORMATO N° 14: OPTIMIZACIÓN DE LOS PERALTES POR EL MÉTODO BISECCIÓN								
DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE PERALTE (m)								
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE OPTIMIZADO POR BISECCIÓN				PERALTE ÓPTIMO (cm)	
			POR RESISTENCIA (cm)	POR SERVICIO (cm)	POR FATIGA (cm)	POR FUERZA CORTANTE (cm)		
9.00	8.00	44.00	33.04	29.18	30.21	29.40	33.04	

Nota: Esta tabla muestra el peralte óptimo de la losa y la verificación de dichos peraltes por resistencia I, servicio I, fatiga I y fuerza cortante para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por el método de la bisección.

Tabla 23. Evaluación de los peraltes por optimización del método sección aurea

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO						
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA						
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"							
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR							
FECHA:								
FORMATO N° 15: OPTIMIZACIÓN DE LOS PERALTES POR EL MÉTODO SECCIÓN AUREA								
DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE PERALTE (m)								
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE OPTIMIZADO POR SECCIÓN AUREA				PERALTE ÓPTIMO (cm)	
			POR RESISTENCIA (cm)	POR SERVICIO (cm)	POR FATIGA (cm)	POR FUERZA CORTANTE (cm)		
9.00	8.00	44.00	30.51	28.31	28.69	29.30	30.51	

Nota: Esta tabla muestra el peralte óptimo de la losa y la verificación de dichos peraltes por resistencia I, servicio I, fatiga I y fuerza cortante para una longitud de 8.00m, sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea.

- c) **Análisis de la prueba:** De acuerdo a la **Tabla 21**, para un puente de longitud de 8.00m, el valor elegido del peralte optimizado por el método del paso constante,



considera las verificaciones por resistencia, por servicio, por fatiga y por fuerzas cortantes, eligiendo el máximo valor de estas, siendo la verificación por resistencia la que determine el peralte óptimo de diseño. También se observa que el valor del peralte optimizado es menor respecto al sin optimizar.

De acuerdo a la **Tabla 22**, para un puente de longitud de 8.00m, el valor elegido del peralte optimizado por el método de bisección, considera las verificaciones por resistencia, por servicio, por fatiga y por fuerzas cortantes, eligiendo el máximo valor de estas, siendo la verificación por resistencia la que determine el peralte óptimo de diseño. También se observa que el valor del peralte optimizado es menor respecto al sin optimizar.

De acuerdo a la **Tabla 23**, para un puente de longitud de 8.00m, el valor elegido del peralte optimizado por el método de la sección aurea, considera las verificaciones por resistencia, por servicio, por fatiga y por fuerzas cortantes, eligiendo el máximo valor de estas, siendo la verificación por resistencia la que determine el peralte óptimo de diseño. También se observa que el valor del peralte optimizado es menor respecto al sin optimizar.

Cabe indicar que para cada longitud del puente el peralte predominante es variable, ya que cada puente de acuerdo a su longitud tiene un comportamiento diferente, además de los tres métodos de optimización se ha elegido al método de la sección aurea, ya que converge rápidamente en un menor número de iteraciones, tal como se mostró en el ejemplo del ítem 2.5.6.3. *Método de Sección Aurea*.

3.6.5. Evaluación de Parámetros de la Función Objetivo

- a) **Procesamiento:** Se muestran las fórmulas matemáticas empleadas para determinar los parámetros de la función objetivo (costo directo referencial), tomándose en cuenta lo especificado en el ítem 2.5.8. cabe indicar que la función objetivo está compuesta por subfunciones que a continuación se describen.

Para el cálculo del parámetro volumen de concreto se emplea la fórmula de la **Figura 54**, para el parámetro área de encofrado se emplea la fórmula de la **Figura 55**, para el parámetro peso del acero se emplea la fórmula de la **Figura 56** y para el parámetro costo directo referencial (función objetivo) se emplea la fórmula de la **Figura 57**; tanto para un diseño sin optimizar y optimizado (por los métodos del paso constante, bisección y sección aurea).



Figura 54. Algoritmo del parámetro volumen de concreto(m3)

> $\text{Concreto} := \text{AnchoTablero} * \text{hoptima} / 100 * \text{LuzPuente};$

Figura 55. Algoritmo del parámetro área de encofrado (m2)

> $\text{Encofrado} := (\text{AnchoTablero} * \text{LuzPuente} + 2 * \text{hoptima} / 100 * \text{LuzPuente} + 2 * \text{AnchoTablero} * \text{hoptima} / 100);$

Figura 56. Algoritmo del parámetro peso del acero (tnf)

> $\text{Peso} := (\text{VsP} + \text{VsD} + 2 * \text{VsT}) * \text{b} * \text{PEAcero} * 1000;$



Figura 57. Algoritmo del parámetro costo directo referencial (soles)

> $\text{CostoTotal} := \text{Concreto} * \text{PUnitConcreto} + \text{Encofrado} * \text{PUnitEncofrado} + \text{PesoAcero} * 1000 * \text{PUnitAcero};$

b) En la **Tabla 24** y **Tabla 25** se registran los datos utilizando las fórmulas expuestas en el apartado **a)**, en ellas se muestran la toma de datos de los parámetros de diseño (volumen de concreto, área del encofrado y peso del acero de refuerzo) de la función objetivo (costo directo final) optimizada por el método de la sección aurea y sin optimizar; para una comparación aplicativa se ha tomado como ejemplo una longitud de un puente de 8.00m, así mismo se ha elegido como método de optimización a la sección aurea, la elección de este método se debe a su rápida convergencia en el número de iteraciones que utiliza este algoritmo para encontrar el valor mínimo.





Tabla 24. Evaluación de los parámetros de la función objetivo sin optimizar

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO					
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA					
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"						
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR						
FECHA:							
FORMATO N° 16: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN OBJETIVO SIN OPTIMIZAR							
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO - COSTO DIRECTO REFERENCIAL					
		PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	VOLUMEN CONCRETO (m3)	ÁREA DE ENCOFRADO (m2)	PESO DEL ACERO (Tonf)	COSTO FINAL (soles)	
9.00	8.00	44.00	29.57	81.63	2.5640	S/ 30,345.50	

Nota: Esta tabla muestra la variable peralte de la losa y los parámetros de la función objetivo (volumen de concreto, área de encofrado, peso del acero de refuerzo y el costo directo referencial) para una longitud de 8.00m, sin optimizar.

Tabla 25. Evaluación de los parámetros de la función objetivo optimizada

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO					
		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA					
		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"						
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR						
FECHA:							
FORMATO N° 17: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN OBJETIVO OPTIMIZADA - SECCIÓN AUREA							
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO - COSTO DIRECTO REFERENCIAL					
		PERALTE ÓPTIMO (cm)	VOLUMEN CONCRETO (m3)	ÁREA DE ENCOFRADO (m2)	PESO DEL ACERO (Tonf)	COSTO FINAL (soles)	
9.00	8.00	30.51	20.50	77.21	2.5739	S/ 25,976.63	

Nota: Esta tabla muestra la variable peralte de la losa y los parámetros de la función objetivo (volumen de concreto, área de encofrado, peso del acero de refuerzo y el costo directo referencial) para una longitud de 8.00m, optimizada por el método de la sección aurea.



c) **Análisis de la prueba:** De acuerdo a la comparación entre un método optimizado (por el método de la sección aurea) respecto a otro sin optimizar (ver **Tabla 24** y **Tabla 25**), para un puente de longitud de 8.00m, los parámetros como el peralte, volumen total del concreto, el área total del encofrado y la función objetivo (costo directo final) son menores, mientras el valor del parámetro peso del acero de refuerzo es mayor. Todo ello debido a que los parámetros como el volumen de concreto, área de encofrado y función objetivo (costo final) son directamente proporcionales a su peralte, mientras que el parámetro acero de refuerzo es inversamente proporcional; ya que a menor peralte mayor serán los momentos flectores y fuerzas cortantes, por tanto, el peso del acero aumentará. Finalmente, como ejemplo de la **Tabla 24**, se tiene que la función objetivo sin optimizar posee un costo final de S/. 30,345.50 soles, mientras que la función objetivo optimizada de la **Tabla 25**, tiene un costo final de S/. 25,976.63 soles, teniendo una diferencia de S/. 4,368.87 soles.



4. Capítulo IV: Resultados

4.1. Momentos Flectores y Reacciones Máximas por Cargas Vivas y Permanentes

4.1.1. Momentos Flectores Máximos por Cargas Vivas y Permanentes sin Optimizar y Optimizado

Tabla 26. Momentos flectores máximos por cargas vivas y permanentes sin optimizar

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"							
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR							
FECHA:								
FORMATO N° 06: EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) SIN OPTIMIZAR								
EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES SIN OPTIMIZAR, POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA								
ITEM	LONG PUENTE (m)	X max (m)	MOMENTOS POR CARGAS					
			VIVAS (HL-93)			PERMANENTES		
			Tandem (Tnf-m)	Carril Diseño S/C (Tnf-m)	Viva+33% Impacto (Tnf-m)	Muerta DC (Tnf-m)	Muerta DW (Tnf-m)	Momento máximo (Tnf-m)
1.00	4.00	1.70	16.3863	1.8651	23.6588	1.3138	0.2151	17.3875
2.00	4.50	1.95	19.1646	2.3719	27.8608	1.7901	0.2735	19.8627
3.00	5.00	2.20	21.9542	2.9383	32.1375	2.3654	0.3388	23.0087
4.00	5.50	2.45	24.7521	3.5644	36.4847	3.0488	0.4110	26.3259
5.00	6.00	2.70	27.5562	4.2501	40.8998	3.8491	0.4901	29.7933
6.00	6.50	2.95	30.3650	4.9954	45.3809	4.7755	0.5760	33.4233
7.00	7.00	3.20	33.1776	5.8003	49.9265	5.8368	0.6688	37.2285
8.00	7.50	3.45	35.9932	6.6649	54.5358	7.0421	0.7685	41.2211
9.00	8.00	3.70	38.8112	7.5891	59.2079	8.4005	0.8751	45.4136
10.00	8.50	3.95	41.6311	8.5729	63.9423	9.9208	0.9885	49.8181
11.00	9.00	4.20	44.4528	9.6163	68.7385	11.6122	1.1088	54.4469
12.00	9.50	4.45	47.2759	10.7194	73.5963	13.4835	1.2360	59.3120
13.00	10.00	4.70	50.1001	11.8821	78.5152	15.5438	1.3701	64.4253
14.00	10.50	4.95	52.9254	13.1044	83.4952	17.8022	1.5110	69.7989
15.00	11.00	5.20	55.7516	14.3863	88.5359	20.2675	1.6588	75.4445
16.00	11.50	5.45	58.5785	15.7279	93.6373	22.9489	1.8135	81.3740
17.00	12.00	5.70	61.4061	17.1291	98.7992	25.8552	1.9751	87.5991

Nota: Esta tabla muestra la distancia máxima donde se generan los momentos flectores máximos de diseño por cargas vivas HL-93 (tándem, carril y viva más impacto) y permanentes, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m, sin optimizar por el estado límite de resistencia I.



De acuerdo a la **Tabla 26**, se presentan valores de los momentos flectores máximos por cargas vivas (HL:93) y permanentes (carga muerta DC y DW) sin optimizar, por estado límite de resistencia para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; las cargas vivas están conformadas por la combinación de: 33% de incremento por carga dinámica Tándem más la carga del carril de diseño (de acuerdo a las especificaciones del ítem 2.3.6), estas cargas vivas son distribuidas en anchos de franjas equivalentes.

Tabla 27. Momentos flectores máximos por cargas vivas y permanentes optimizados

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"							
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR							
FECHA:								
FORMATO N°07: EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES MÁXIMOS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) OPTIMIZADOS								
EVALUACIÓN DE MOMENTOS FLECTORES OPTIMIZADOS (POR SECCIÓN AUREA), POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA								
ITEM	LONG PUENTE (m)	X max (m)	MOMENTOS POR CARGAS					
			VIVAS (HL-93)			PERMANENTES		
			Tandem (Tnf-m)	Carril Diseño S/C (Tnf-m)	Viva+33% Impcto (Tnf-m)	Muerta DC (Tnf-m)	Muerta DW (Tnf-m)	Momento máximo (Tnf-m)
1.00	4.00	1.70	16.3863	1.8612	23.6549	1.1261	0.2151	17.1503
2.00	4.50	1.95	19.1646	2.3669	27.8558	1.4500	0.2735	19.4345
3.00	5.00	2.20	21.9542	2.9322	32.1313	1.8554	0.3388	22.3673
4.00	5.50	2.45	24.7521	3.5569	36.4772	2.3225	0.4110	25.4135
5.00	6.00	2.70	27.5562	4.2412	40.8909	2.8441	0.4901	28.5317
6.00	6.50	2.95	30.3650	4.9849	45.3704	3.4308	0.5760	31.7364
7.00	7.00	3.20	33.1776	5.7882	49.9144	4.1258	0.6688	35.0826
8.00	7.50	3.45	35.9932	6.6509	54.5218	4.9329	0.7685	38.5765
9.00	8.00	3.70	38.8112	7.5732	59.1920	5.8249	0.8751	42.1850
10.00	8.50	3.95	41.6311	8.5549	63.9243	6.8186	0.9885	45.9302
11.00	9.00	4.20	44.4528	9.5962	68.7184	7.9137	1.1088	49.8126
12.00	9.50	4.45	47.2759	10.6969	73.5738	9.3049	1.2360	54.0764
13.00	10.00	4.70	50.1001	11.8572	78.4903	10.4250	1.3701	58.0132
14.00	10.50	4.95	52.9254	13.0769	83.4677	11.8611	1.5110	62.3576
15.00	11.00	5.20	55.7516	14.3562	88.5057	13.4108	1.6588	66.8573
16.00	11.50	5.45	58.5785	15.6949	93.6043	15.1072	1.8135	71.5543
17.00	12.00	5.70	61.4061	17.0932	98.7633	16.9319	1.9751	76.4260

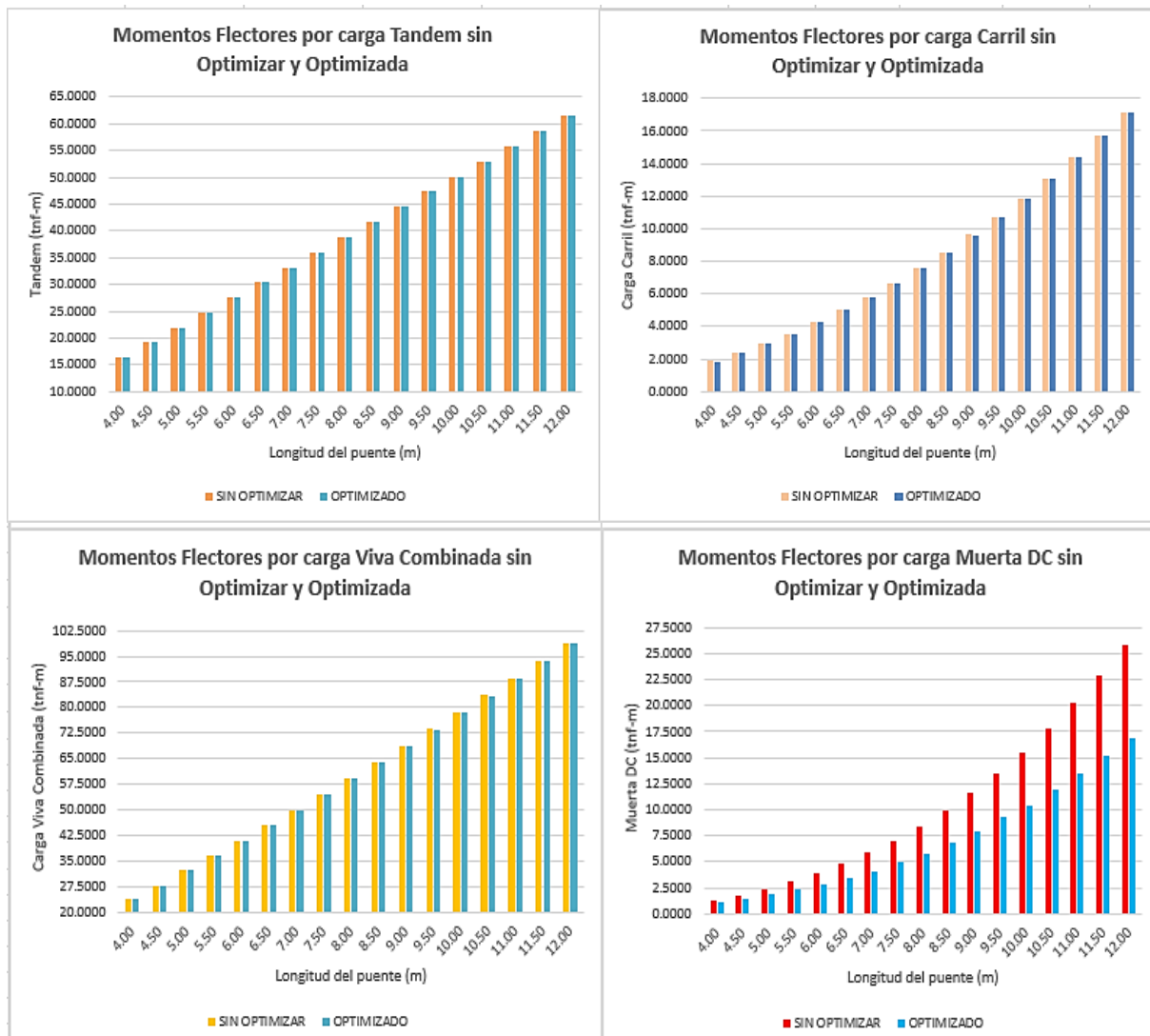
Nota: Esta tabla muestra la distancia máxima donde se generan los momentos flectores máximos de diseño por cargas vivas HL-93 (tándem, carril y viva más impacto) y permanentes, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m, optimizados por el método de la sección aurea para el estado límite resistencia I.

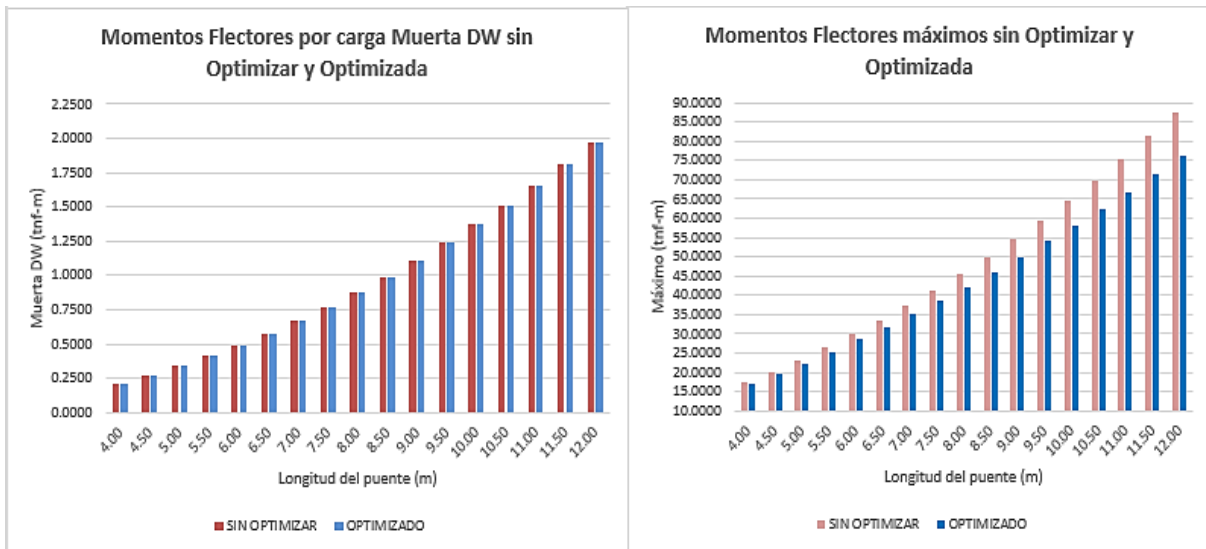


De acuerdo a la **Tabla 27**, se presentan los valores de los momentos flectores máximos por cargas vivas (HL:93) y permanentes (carga muerta DC y DW) optimizadas (por el método de la sección aurea), por estado límite de resistencia, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; las cargas vivas están conformadas por la combinación de: 33% de incremento por carga dinámica Tándem más la carga del carril de diseño (de acuerdo a las especificaciones del ítem 2.3 y 2.4), estas cargas vivas son distribuidas en anchos de franjas equivalentes.

4.1.2. Comparación de cargas de diseño para Momentos Flectores Máximos sin Optimizar y Optimizados

Figura 58. Comparación de momentos flectores sin optimizar y optimizados por cargas





Nota: Esta figura se muestra la comparación de tipo de cargas de diseño y los momentos flectores máximos que estos generan sin optimizar y optimizados (por el método de sección aurea) para el estado límite de resistencia I.

De acuerdo a los diagramas de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa la comparación de cargas de diseño intervinientes en los momentos flectores máximos sin optimizar y optimizados por estado límite de resistencia para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m (por sección aurea), estas cargas son: tándem, carril de diseño, viva, muertas DC, muerta DW y el momento flector máximo de diseño.

De la comparación de cargas tándem, carril de diseño, viva y muerta DW sin optimizar y optimizado no existe variación, por tanto, los valores son los mismos tanto para un diseño sin optimizar y optimizado.

De la comparación de cargas muertas DC sin optimizar y optimizados existe una variación notable, donde los valores optimizados son menores notablemente, por tanto, es en este tipo de cargas donde mejor se optimizan.

De la comparación de momentos flectores máximos sin optimizar y optimizados existe una variación ligera, donde los valores optimizados son menores ligeramente.



4.1.3. Reacciones Máximas por Cargas Vivas y Permanentes sin Optimizar y Optimizada

Tabla 28. Reacciones máximas por cargas vivas y permanentes sin optimizar

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"					
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR					
FECHA:						
FORMATO N°08: EVALUACIÓN DE REACCIONES MÁXIMAS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) SIN OPTIMIZAR						
EVALUACIÓN DE LAS REACCIONES SIN OPTIMIZAR, POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA						
ITEM	LONG PUENTE (m)	REACCIONES POR CARGAS				
		VIVAS (HL-93)			PERMANENTES	
		Camión ó Tandem(*) (Tnf)	Carril Diseño S/C (Tnf)	Viva+33% Impacto (Tnf)	Muerta DC (Tnf)	Muerta DW (Tnf)
1.00	4.00	19.2780 (*)	1.9040	27.5437	1.3440	0.2200
2.00	4.50	19.6560 (*)	2.1420	28.2845	1.6200	0.2475
3.00	5.00	19.9584 (*)	2.3800	28.9247	1.9200	0.2750
4.00	5.50	20.2058 (*)	2.6180	29.4917	2.2440	0.3025
5.00	6.00	20.4120 (*)	2.8560	30.0040	2.5920	0.3300
6.00	6.50	20.5865 (*)	3.0940	30.4740	2.9640	0.3575
7.00	7.00	20.7360 (*)	3.3320	30.9109	3.3600	0.3850
8.00	7.50	20.8656 (*)	3.5700	31.3212	3.7800	0.4125
9.00	8.00	21.2900	3.8080	32.1236	4.2240	0.4400
10.00	8.50	21.7458	4.0460	32.9680	4.6920	0.4675
11.00	9.00	22.3366	4.2840	33.9917	5.1840	0.4950
12.00	9.50	22.8805	4.5220	34.9530	5.7000	0.5225
13.00	10.00	23.3699	4.7600	35.8420	6.2400	0.5500
14.00	10.50	23.8128	4.9980	36.6690	6.8040	0.5775
15.00	11.00	24.2154	5.2360	37.4425	7.3920	0.6050
16.00	11.50	24.5830	5.4740	38.1694	8.0040	0.6325
17.00	12.00	24.9200	5.7120	38.8555	8.6400	0.6600

Nota: Esta tabla muestra las reacciones máximas por cargas vivas HL-93 (tándem, carril y viva más impacto) y permanentes, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m, sin optimizar para el estado límite de resistencia I.

De acuerdo a la **Tabla 28**, se presentan los valores de las reacciones máximas por cargas vivas (HL:93) y permanentes (carga muerta DC y DW) sin optimizar, por estado límite de resistencia I, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; las cargas vivas están conformadas por la combinación de: 33% de incremento por el máximo valor de la carga dinámica Tándem(*) o Camión más la carga del carril de diseño (de acuerdo a las



especificaciones del ítem 2.3.6), estas cargas vivas son distribuidas en anchos de franjas equivalentes.

Tabla 29. Reacciones máximas por cargas vivas y permanentes optimizadas

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO		FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
						
TESIS:	"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"					
TESISTA:	BACH. VILLAVICENCIO VILLAVICENCIO, AMADOR					
FECHA:						
FORMATO N°09: EVALUACIÓN DE REACCIONES MÁXIMAS POR CARGAS (HL-93 Y PERMANENTES) OPTIMIZADOS						
EVALUACIÓN DE REACCIONES OPTIMIZADAS (POR SECCIÓN AUREA), POR ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA						
ITEM	LONG PUENTE (m)	REACCIONES POR CARGAS				
		VIVAS (HL-93)			PERMANENTES	
		Camión ó Tandem(*) (Tnf)	Carril Diseño S/C (Tnf)	Viva+33% Impacto (Tnf)	Muerta DC (Tnf)	Muerta DW (Tnf)
1.00	4.00	19.2780 (*)	1.9040	27.5437	1.1520	0.2200
2.00	4.50	19.6560 (*)	2.1420	28.2845	1.3122	0.2475
3.00	5.00	19.9584 (*)	2.3800	28.9247	1.5060	0.2750
4.00	5.50	20.2058 (*)	2.6180	29.4917	1.7094	0.3025
5.00	6.00	20.4120 (*)	2.8560	30.0040	1.9152	0.3300
6.00	6.50	20.5865 (*)	3.0940	30.4740	2.1294	0.3575
7.00	7.00	20.7360 (*)	3.3320	30.9109	2.3750	0.3850
8.00	7.50	20.8656 (*)	3.5700	31.3212	2.6478	0.4125
9.00	8.00	21.2900	3.8080	32.1236	2.9289	0.4400
10.00	8.50	21.7458	4.0460	32.9680	3.2248	0.4675
11.00	9.00	22.3366	4.2840	33.9917	3.5329	0.4950
12.00	9.50	22.8805	4.5220	34.9530	3.9336	0.5225
13.00	10.00	23.3699	4.7600	35.8420	4.1851	0.5500
14.00	10.50	23.8128	4.9980	36.6690	4.5333	0.5775
15.00	11.00	24.2154	5.2360	37.4425	4.8912	0.6050
16.00	11.50	24.5830	5.4740	38.1694	5.2690	0.6325
17.00	12.00	24.9200	5.7120	38.8555	5.6581	0.6600

Nota: Esta tabla muestra las reacciones máximas por cargas vivas HL-93 (tándem, carril y viva más impacto) y permanentes, para longitudes de entre 4.00m y 12.00m, optimizadas por el método de la sección aurea para el estado límite de resistencia I.

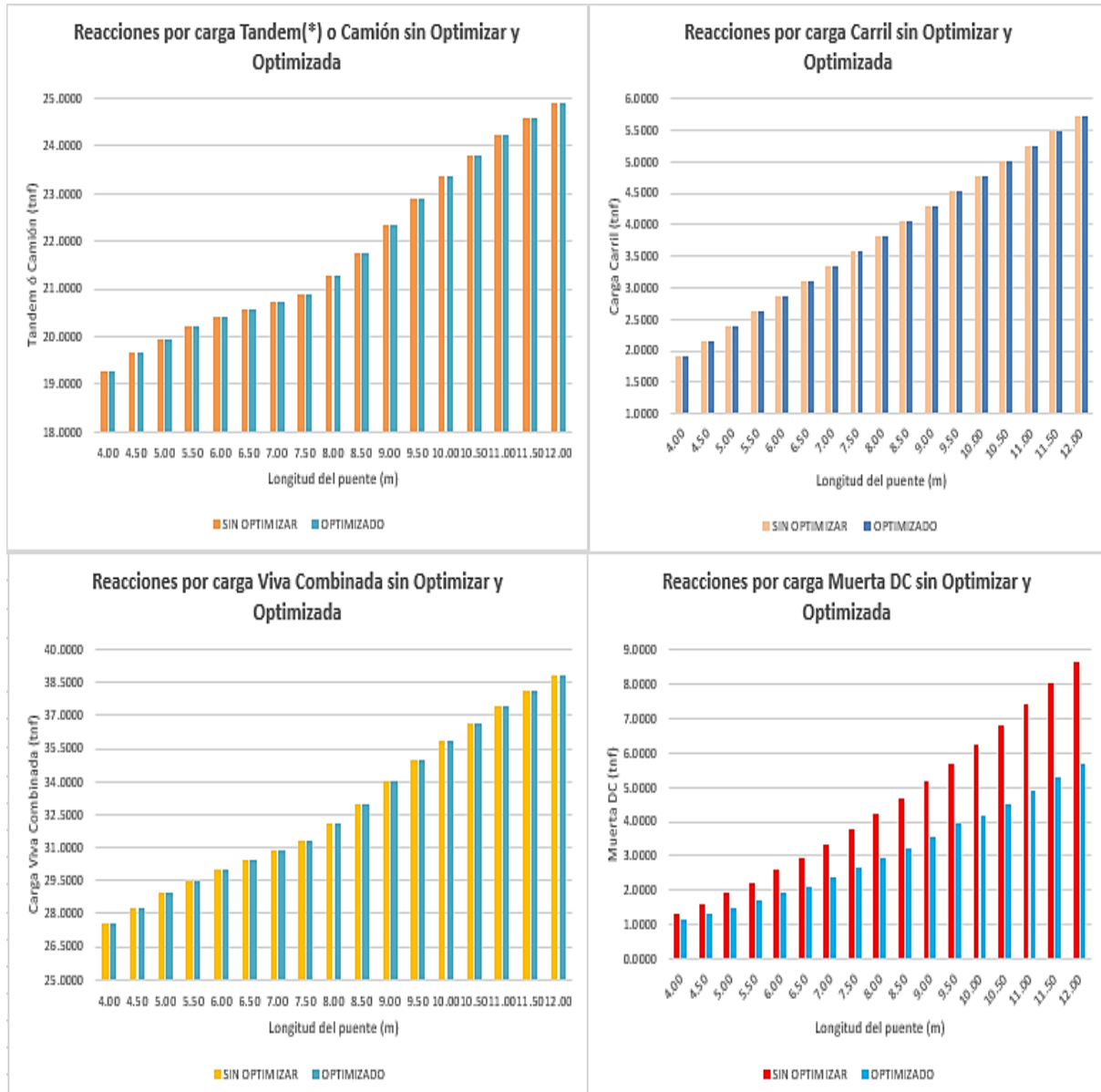
De acuerdo a la **Tabla 29**, se presentan los valores de las reacciones máximas por cargas vivas (HL:93) y permanentes (carga muerta DC y DW) optimizadas (por el método de la sección aurea), por estado límite de resistencia, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; las cargas vivas están conformadas por la combinación de: 33% de

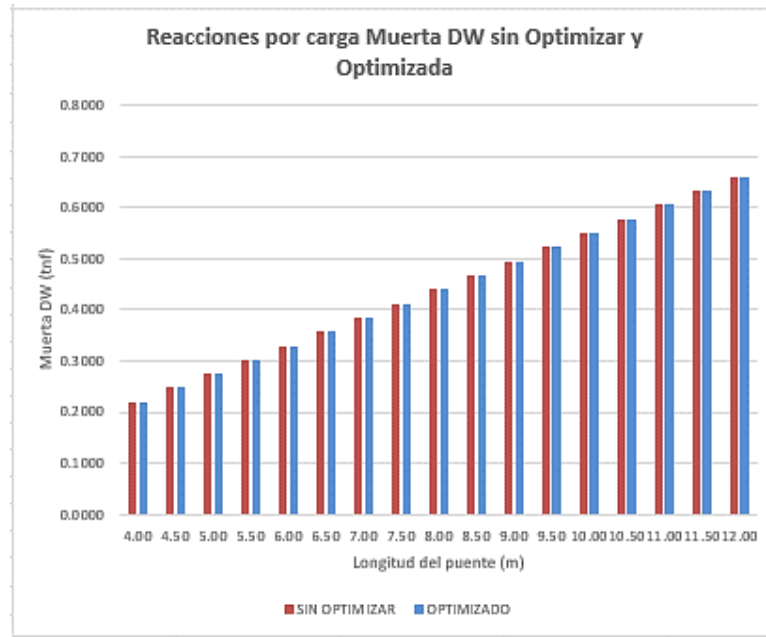


incremento por el máximo valor de la carga dinámica Tándem (*) o Camión más la carga del carril de diseño (de acuerdo a las especificaciones del ítem 2.3 y 2.4), estas cargas vivas son distribuidas en anchos de franjas equivalentes.

4.1.4. Comparación de cargas de Diseño para Reacciones Máximas sin Optimizar y Optimizados

Figura 59. Comparación de reacciones máximas sin optimizar y optimizados por cargas





Nota: Esta figura se muestra la comparación de tipo de cargas de diseño y las reacciones máximas que estos generan sin optimizar y optimizados (por el método de sección aurea) para el estado límite de resistencia I.

De acuerdo a los diagramas de la **Figura 59**, se observa la comparación de cargas de diseño intervinientes en las reacciones máximas sin optimizar y optimizados por estado límite de resistencia para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m (por sección aurea), estas cargas son: tándem o camión, carril de diseño, viva, muertas DC y muerta DW.

De la comparación de cargas tándem o camión, carril de diseño, viva y muerta DW sin optimizar y optimizado no existe variación, por tanto, los valores son los mismos tanto para un diseño sin optimizar y optimizado.

De la comparación de cargas muertas DC sin optimizar y optimizados existe una variación notable, donde los valores optimizados son menores notablemente, por tanto, es en este tipo de cargas donde mejor se optimizan.

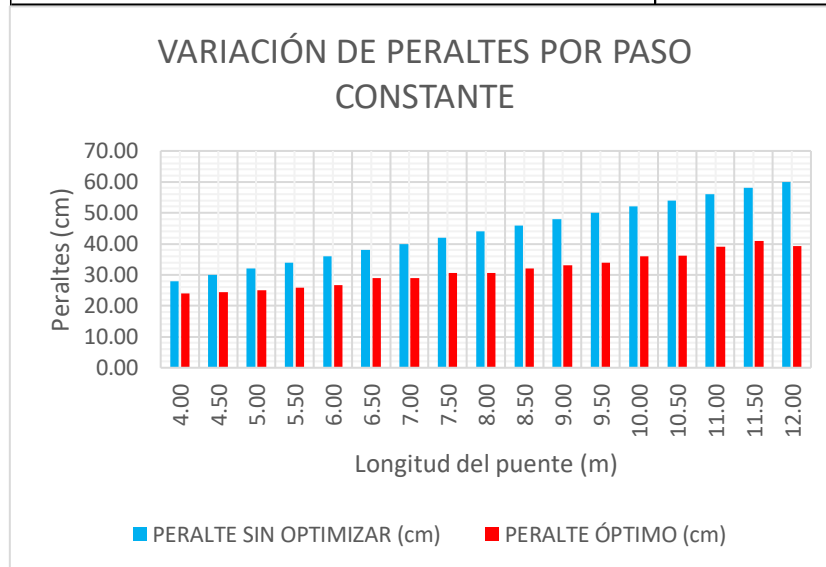
4.2. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados

4.2.1. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados (por Paso Constante)

Tabla 30. Variación porcentual de peraltes sin optimizar y optimizados (paso constante)



VARIACIÓN DE PERALTES POR PASO CONSTANTE				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE ÓPTIMO (cm)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	28.00	24.00	14.29
2.00	4.50	30.00	24.30	19.00
3.00	5.00	32.00	25.10	21.56
4.00	5.50	34.00	25.90	23.82
5.00	6.00	36.00	26.60	26.11
6.00	6.50	38.00	29.00	23.68
7.00	7.00	40.00	29.00	27.50
8.00	7.50	42.00	30.60	27.14
9.00	8.00	44.00	30.50	30.68
10.00	8.50	46.00	32.00	30.43
11.00	9.00	48.00	33.00	31.25
12.00	9.50	50.00	34.00	32.00
13.00	10.00	52.00	36.00	30.77
14.00	10.50	54.00	36.20	32.96
15.00	11.00	56.00	39.00	30.36
16.00	11.50	58.00	41.00	29.31
17.00	12.00	60.00	39.30	34.50
Δ MEDIA %				27.38



Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) de los peraltes de la losa sin optimizar y optimizados por el método del paso constante, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.

De acuerdo a la **Tabla 30**, la variación porcentual entre un peralte sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de paso constante, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; los valores optimizados son menores. Existe una variación porcentual máxima de 34.50% (para una luz de 12.00m), mínima de 14.29% (para una luz de 4.00m) y promedio de 27.38% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores de los

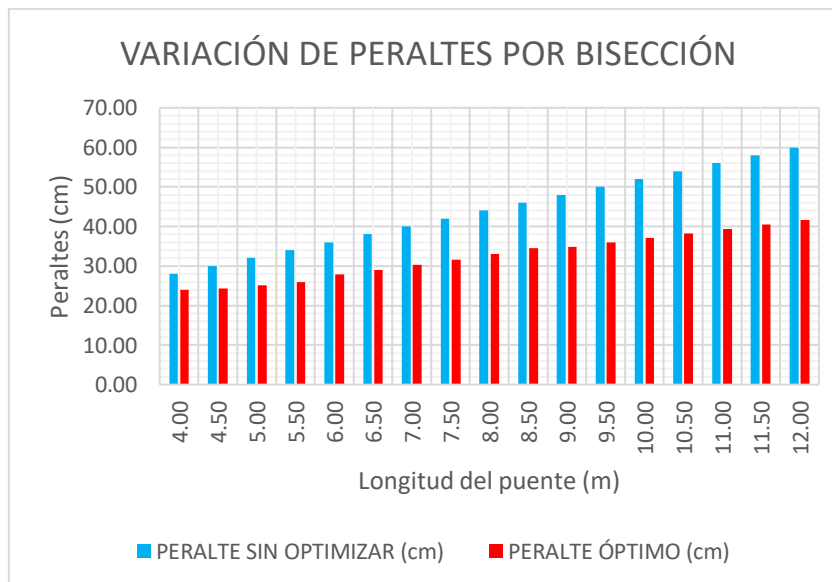


peraltes optimizados son menores en casi 27.38% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una variación notable.

4.2.2. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados (por Bisección)

Tabla 31. Variación porcentual de peraltes sin optimizar y optimizados (bisección)

VARIACIÓN DE PERALTES POR BISECCIÓN				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE ÓPTIMO (cm)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	28.00	24.00	14.29
2.00	4.50	30.00	24.30	19.00
3.00	5.00	32.00	25.10	21.56
4.00	5.50	34.00	25.90	23.82
5.00	6.00	36.00	27.81	22.75
6.00	6.50	38.00	29.06	23.54
7.00	7.00	40.00	30.27	24.32
8.00	7.50	42.00	31.54	24.90
9.00	8.00	44.00	33.04	24.90
10.00	8.50	46.00	34.54	24.90
11.00	9.00	48.00	34.83	27.44
12.00	9.50	50.00	35.99	28.03
13.00	10.00	52.00	37.04	28.76
14.00	10.50	54.00	38.21	29.25
15.00	11.00	56.00	39.29	29.83
16.00	11.50	58.00	40.47	30.22
17.00	12.00	60.00	41.57	30.71
Δ MEDIA %				25.19



Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) de los peraltes de la losa sin optimizar y optimizados por el método de la bisección, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.

De acuerdo a la **Tabla 31**, la variación porcentual entre un peralte sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de bisección, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m,

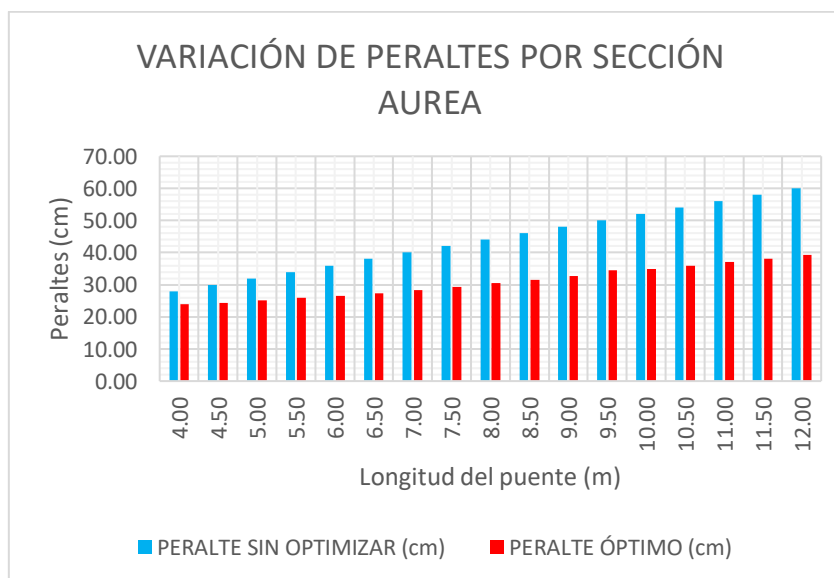


6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; los valores optimizados son menores. Existe una variación porcentual máxima de 30.71% (para una luz de 12.00m), mínima de 14.29% (para una luz de 4.00m) y promedio de 25.19% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores de los peraltes optimizados son menores en casi 25.19% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una variación notable.

4.2.3. Comparación de Peraltes Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)

Tabla 32. Variación porcentual de peraltes sin optimizar y optimizados (sección aurea)

VARIACIÓN DE PERALTES POR SECCIÓN AUREA				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	PERALTE SIN OPTIMIZAR (cm)	PERALTE ÓPTIMO (cm)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	28.00	24.00	14.29
2.00	4.50	30.00	24.30	19.00
3.00	5.00	32.00	25.10	21.56
4.00	5.50	34.00	25.90	23.82
5.00	6.00	36.00	26.60	26.11
6.00	6.50	38.00	27.30	28.16
7.00	7.00	40.00	28.27	29.31
8.00	7.50	42.00	29.42	29.95
9.00	8.00	44.00	30.51	30.66
10.00	8.50	46.00	31.62	31.27
11.00	9.00	48.00	32.71	31.85
12.00	9.50	50.00	34.50	30.99
13.00	10.00	52.00	34.88	32.93
14.00	10.50	54.00	35.98	33.37
15.00	11.00	56.00	37.05	33.83
16.00	11.50	58.00	38.18	34.17
17.00	12.00	60.00	39.29	34.51
Δ MEDIA %				28.58



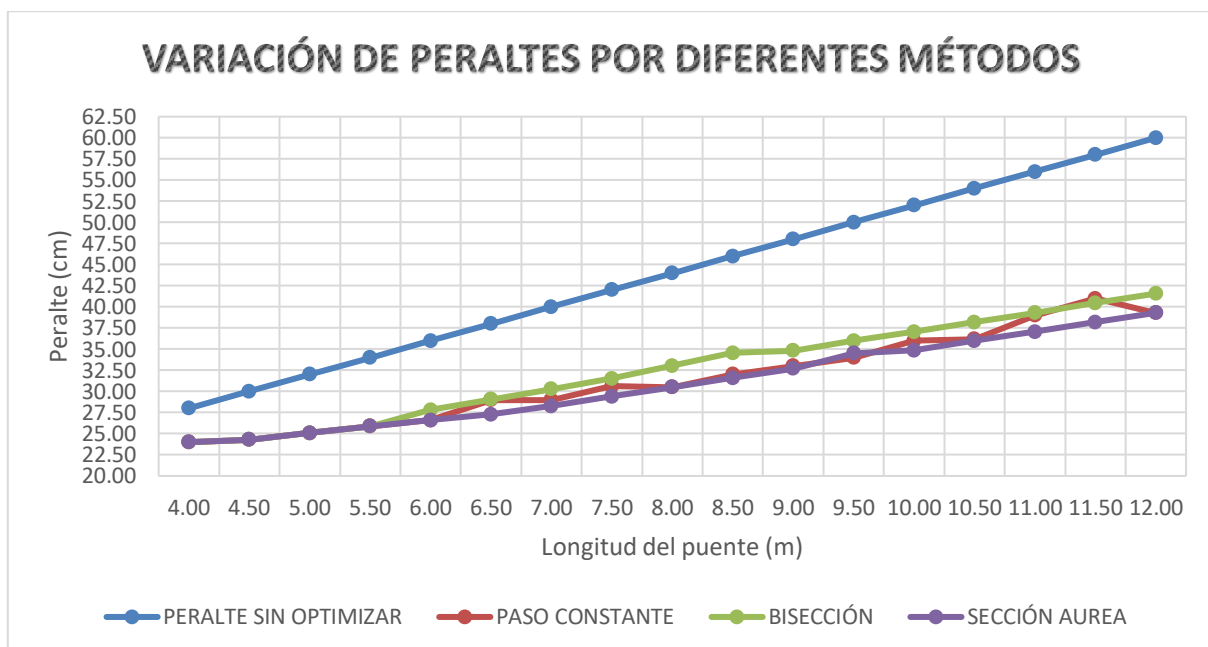
Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) de los peraltes de la losa sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.



De acuerdo a la **Tabla 32**, la variación porcentual entre un peralte sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de la sección aurea, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; los valores optimizados son menores. Existe una variación porcentual máxima de 34.51% (para una luz de 12.00m), mínima de 14.29% (para una luz de 4.00m) y promedio de 28.58% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores de los peraltes optimizados son menores en casi 28.58% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una variación notable.

4.2.4. Comparación de Peraltes Optimizados y Sin Optimizar (por varios métodos)

Figura 60. Comparación de peraltes sin optimizar y optimizados



De acuerdo al gráfico de líneas de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los valores de los peraltes sin optimizar respecto a los optimizados por los métodos del paso constante, bisección y sección aurea, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, resultan ser menores. De estos métodos el que converge rápidamente en un menor número de iteraciones en primer lugar es el método de la sección aurea, en segundo lugar, el método del paso constante y en tercer lugar el método de bisección.

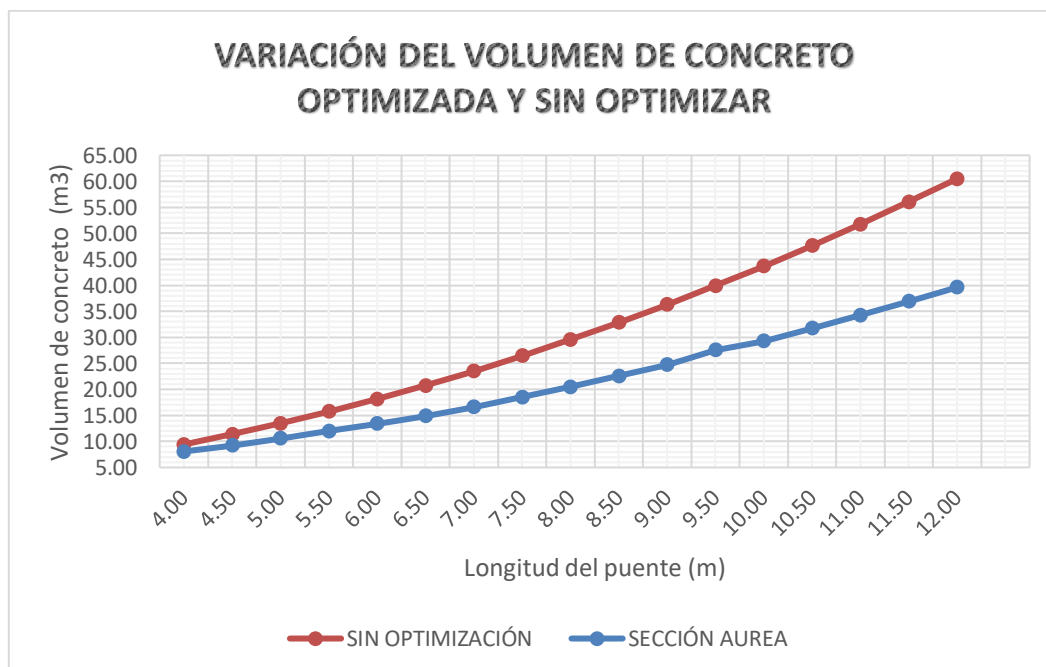


4.3. Comparación de Volúmenes de Concreto Sin Optimizar y Optimizados

4.3.1. Comparación de Volúmenes de Concreto Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)

Tabla 33. Variación porcentual del volumen de concreto sin optimizar y optimizados

VARIACIÓN DEL VOLUMEN DE CONCRETO - SECCIÓN AUREA				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	SIN OPTIMIZACIÓN (m3)	OPTIMIZADO (m3)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	9.41	8.06	14.29
2.00	4.50	11.34	9.19	19.00
3.00	5.00	13.44	10.54	21.56
4.00	5.50	15.71	11.97	23.82
5.00	6.00	18.14	13.41	26.11
6.00	6.50	20.75	14.91	28.16
7.00	7.00	23.52	16.63	29.31
8.00	7.50	26.46	18.53	29.95
9.00	8.00	29.57	20.50	30.66
10.00	8.50	32.84	22.57	31.27
11.00	9.00	36.29	24.73	31.85
12.00	9.50	39.90	27.53	30.99
13.00	10.00	43.68	29.30	32.93
14.00	10.50	47.63	31.73	33.37
15.00	11.00	51.74	34.24	33.83
16.00	11.50	56.03	36.88	34.17
17.00	12.00	60.48	39.61	34.51
Δ MEDIA %				28.58



Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) del volumen de concreto sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.



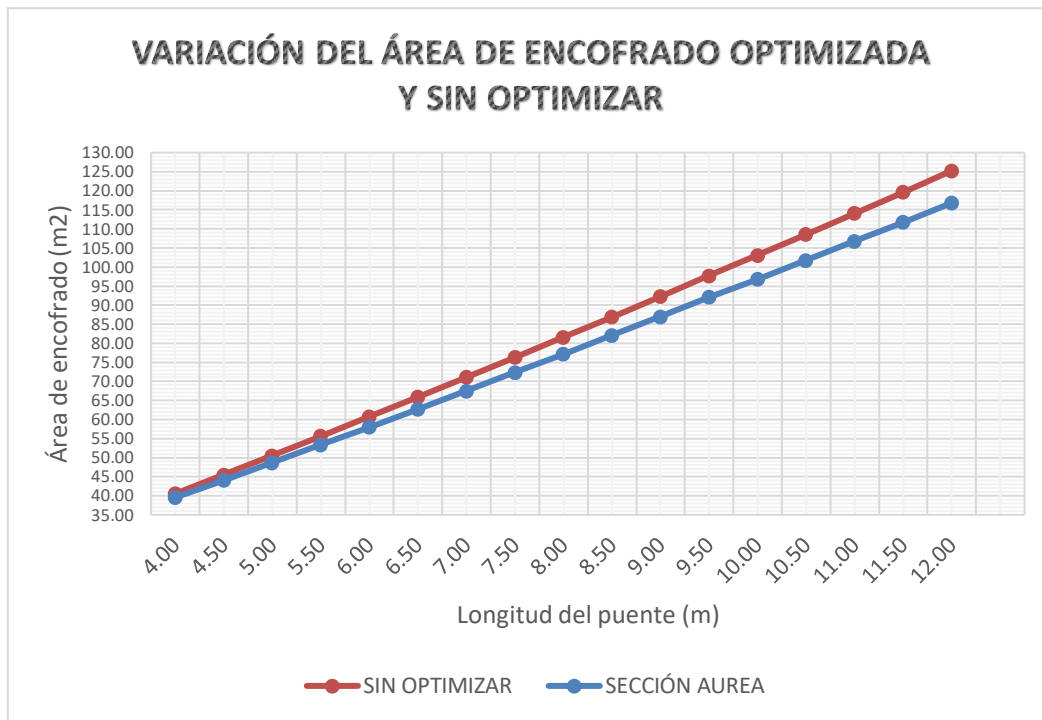
De acuerdo a la **Tabla 33**, la variación porcentual de los volúmenes de concreto sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de sección aurea, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, los valores optimizados son menores. Existe una variación porcentual máxima de 34.51% (para una luz de 12.00m), mínima del 14.29% (para una luz de 4.00m) y promedio de 28.58% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores de los volúmenes de concreto optimizados son menores en casi 28.58% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una variación notable. También se observa que a mayor longitud del puente la variación del volumen de concreto es mayor.

4.4. Comparación de las Áreas de Encofrado Sin optimizar y Optimizados

4.4.1. Comparación de las Áreas de Encofrado Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)

Tabla 34. Variación porcentual del área de encofrado sin optimizar y optimizado

VARIACIÓN DEL ÁREA DE ENCOFRADO - SECCIÓN AUREA				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	SIN OPTIMIZACIÓN (m ²)	OPTIMIZADO (m ²)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	40.54	39.55	2.45
2.00	4.50	45.54	44.07	3.23
3.00	5.00	50.58	48.73	3.66
4.00	5.50	55.65	53.40	4.05
5.00	6.00	60.77	58.06	4.45
6.00	6.50	65.92	62.74	4.84
7.00	7.00	71.12	67.51	5.08
8.00	7.50	76.36	72.36	5.24
9.00	8.00	81.63	77.21	5.42
10.00	8.50	86.95	82.09	5.59
11.00	9.00	92.30	86.98	5.76
12.00	9.50	97.70	92.15	5.68
13.00	10.00	103.14	96.83	6.11
14.00	10.50	108.61	101.80	6.27
15.00	11.00	114.13	106.78	6.44
16.00	11.50	119.68	111.80	6.59
17.00	12.00	125.28	116.83	6.74
Δ MEDIA %				5.15



Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) del área de encofrado sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.

De acuerdo a la **Tabla 34**, la variación porcentual de las áreas de encofrado sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de sección aurea, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, los valores optimizados son menores. Existe una variación porcentual máxima de 6.74% (para una luz de 12.00m), mínima del 2.45% (para una luz de 4.00m) y promedio de 5.15% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores de las áreas de encofrado optimizados son menores en casi 5.15% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una ligera variación. También se observa que a mayor longitud del puente la variación de las áreas de encofrado es mayor.

4.5. Comparación de los Pesos del Acero de Refuerzo Sin Optimizar y Optimizados

4.5.1. Comparación de los Pesos del Acero Sin Optimizar y Optimizados (por Sección Aurea)



Tabla 35. Variación porcentual del peso del acero sin optimizar y optimizado

VARIACIÓN DEL PESO DEL ACERO - SECCIÓN AUREA				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	SIN OPTIMIZACIÓN (Tonf)	OPTIMIZADO (tonf)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	0.99	0.79	20.19
2.00	4.50	1.13	0.94	16.59
3.00	5.00	1.28	1.12	12.25
4.00	5.50	1.47	1.31	10.47
5.00	6.00	1.66	1.53	7.94
6.00	6.50	1.84	1.78	3.46
7.00	7.00	2.06	2.04	0.94
8.00	7.50	2.28	2.29	-0.31
9.00	8.00	2.56	2.57	-0.38
10.00	8.50	2.86	2.85	0.22
11.00	9.00	3.18	3.16	0.52
12.00	9.50	3.46	3.38	2.25
13.00	10.00	3.81	3.78	0.73
14.00	10.50	4.18	4.11	1.57
15.00	11.00	4.50	4.47	0.76
16.00	11.50	4.91	4.82	1.71
17.00	12.00	5.32	5.19	2.48
Δ MEDIA %				4.79



Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) del peso del acero de refuerzo sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.

De acuerdo a la **Tabla 35**, la variación porcentual del peso del acero de refuerzo sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de sección aurea, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m,



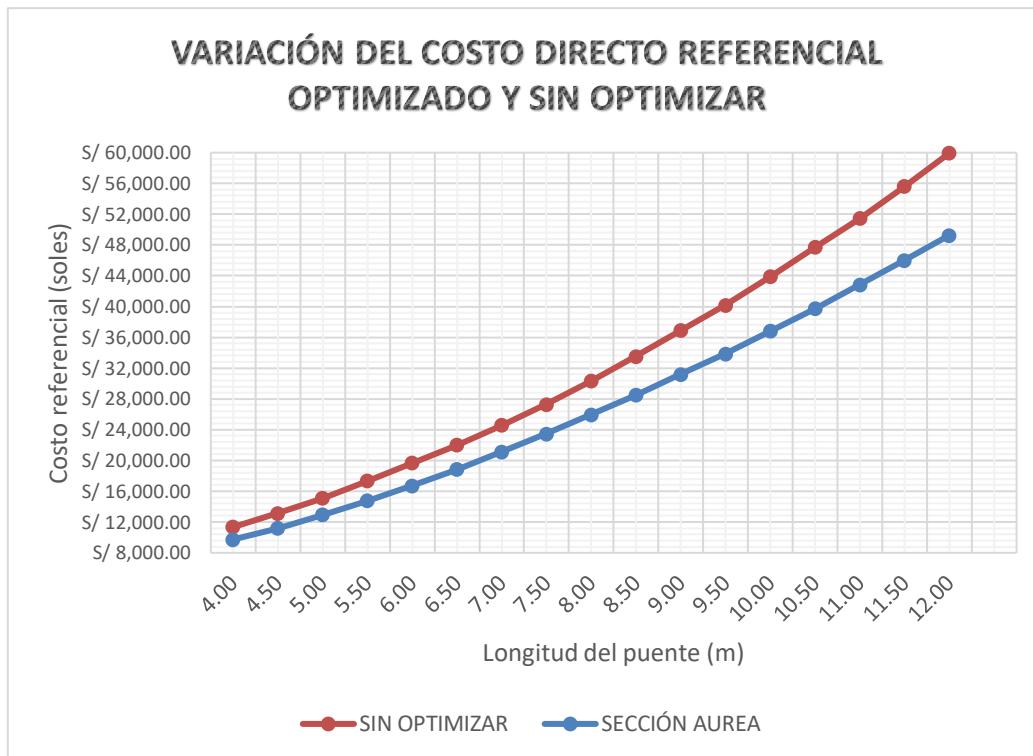
11.00m, 11.50m y 12.00m, los valores optimizados son ligeramente menores respecto a los sin optimizar; a excepción para longitudes de 7.50m y 8.00m donde los valores optimizados son ligeramente mayores respecto a los sin optimizar. Existe una variación porcentual máxima de 20.19% (para una luz de 4.00m), mínima del -0.38% (para una luz de 8.50m) y promedio de 4.79% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores del peso del acero de refuerzo optimizados son menores en casi 4.79% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una ligera variación. También se observa que a menor longitud del puente la variación del peso del acero de refuerzo es mayor.

4.6. Comparación de la función Objetivo Sin Optimizar y Optimizado

4.6.1. Comparación de la función Objetivo (Costo Directo Referencial) Sin Optimizar y Optimizado (por Sección Aurea)

Tabla 36. Variación porcentual de la función objetivo sin optimizar y optimizado

VARIACIÓN DEL COSTO DIRECTO - SECCIÓN AUREA				
ITEM	LONGITUD DEL PUENTE (m)	SIN OPTIMIZACIÓN (costo)	OPTIMIZADO (costo)	VARIACIÓN PORCENTUAL (%)
1.00	4.00	S/ 11,347.16	S/ 9,738.45	14.18
2.00	4.50	S/ 13,154.78	S/ 11,209.47	14.79
3.00	5.00	S/ 15,121.52	S/ 12,954.44	14.33
4.00	5.50	S/ 17,337.64	S/ 14,774.74	14.78
5.00	6.00	S/ 19,681.86	S/ 16,735.03	14.97
6.00	6.50	S/ 21,993.99	S/ 18,832.30	14.38
7.00	7.00	S/ 24,585.23	S/ 21,123.39	14.08
8.00	7.50	S/ 27,304.74	S/ 23,470.68	14.04
9.00	8.00	S/ 30,345.50	S/ 25,976.63	14.40
10.00	8.50	S/ 33,540.02	S/ 28,518.93	14.97
11.00	9.00	S/ 36,909.54	S/ 31,223.98	15.40
12.00	9.50	S/ 40,212.82	S/ 33,857.12	15.81
13.00	10.00	S/ 43,894.80	S/ 36,802.94	16.16
14.00	10.50	S/ 47,732.25	S/ 39,741.83	16.74
15.00	11.00	S/ 51,472.97	S/ 42,860.09	16.73
16.00	11.50	S/ 55,640.67	S/ 46,012.64	17.30
17.00	12.00	S/ 59,950.61	S/ 49,273.47	17.81
Δ MEDIA %				15.35



Nota: Esta tabla muestra la variación porcentual (%) de función objetivo costo directo referencial sin optimizar y optimizados por el método de la sección aurea, para longitudes de entre 4.00 y 12.00m.

De acuerdo a la **Tabla 36**, la variación porcentual de la función objetivo (costos directos referenciales) sin optimizar respecto a otro optimizado por el método de sección aurea, para luces de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, los valores optimizados son menores. Existe una variación porcentual máxima de 17.81% (para una luz de 12.00m), mínima del 14.18% (para una luz de 4.00m) y promedio de 15.35% (para luces comprendidas entre 4.00m y 12.00m). Los valores de los costos directos referenciales optimizados son menores en casi 15.35% respecto a los sin optimizar, por tanto, hay una notable variación. También se observa que a mayor longitud del puente la variación del costo directo referencial es mayor.



5. Capítulo V: Discusión

5.1. Contraste de Resultados con Referentes al Marco Teórico

Discusión N°01: *¿Es posible la aplicación de métodos de optimización matemática para el diseño de puentes tipo losa de concreto armado?*

Como se observa en los resultados de las **Tabla 14** al **Tabla 36**, toda la implementación de la metodología de optimización mediante programación matemática es aplicativa (porque permite modificaciones e implementaciones de algoritmos matemáticos a un análisis y diseño de puentes tipo losa de concreto armado usando el método aproximado del ancho equivalente de franjas del manual de puentes del MTC 2018) y adaptativa (porque se adapta a toda formulación matemática).

Discusión N°02: *¿Es posible la aplicación de criterios de revisión y verificación por fuerzas cortantes para puentes tipo losas de concreto armado?*

Como se observa en la **Tabla 18**, en nuestro proceso de análisis y diseño se ha considerado la verificación y revisión por fuerzas cortantes ya que nuestras losas también actúan como si fuesen vigas; el manual de puentes del MTC 2018, no especifica la revisión y verificación por fuerzas cortantes para puentes tipo losa, pero tampoco restringe dicha verificación, es por ello que se ha decidido incluir en el procedimiento.

Discusión N°03: *¿Es posible la aplicación de criterios de revisión y verificación por deflexión para puentes tipo losas de concreto armado?*

Como se observa en la **Tabla 18**, en nuestro proceso de análisis y diseño se ha considerado solo el cálculo de las deflexiones, más no se ha considerado la revisión y verificación como tal, ya que el manual de puentes del MTC 2018 no especifica dicha revisión. Pero a criterio propio se ha decidido incluir en nuestro procedimiento como un control extra.

Discusión N°04: *¿Es posible la aplicación de optimización para el peso del acero en puentes tipo losas de concreto armado?*

Como se observa en las **Tabla 35**, **Tabla 47** y **Tabla 48**, los valores de los parámetros de la función objetivo (peralte, volumen de concreto y área de encofrado) optimizados por el método de la sección aurea siempre son menores, respecto a otro sin optimizar, con excepción del parámetro peso del acero donde para longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m los valores



optimizados son menores respecto a otros sin optimizar, mientras que para longitudes de 7.50m y 8.00m los valores optimizados son mayores respecto a los sin optimizar; esto debido a que al reducir los peraltes las fuerzas cortantes de diseño se incrementan, en salvaguarda de ello las cantidades de aceros deben aumentar para absorber las fuerzas cortantes. Por tanto, si es posible, de acuerdo a nuestra metodología de implementación de optimización matemática, para el peso del acero en puentes tipo losa de concreto armado con excepción para longitudes de 7.50m y 8.00m.

5.2. Interpretación de los Resultados Encontrados en la Investigación

Discusión N°01: *¿Para qué valores de longitud del puente el peralte óptimo tiene un mejor comportamiento?*

De acuerdo a la **Tabla 30**, **Tabla 31** y **Tabla 32**, el método de optimización que mejores valores mínimos otorga es el método de la sección aurea. Ahora de acuerdo a la **Tabla 32** se tiene que a mayor longitud del puente el peralte optimizado otorga un mejor rango de variación porcentual, así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene un peralte sin optimizar de 28.00m y otro optimizado de 24.00m donde se tiene una variación porcentual del 14.29%, mientras que para una longitud de puente de 12.00m se tiene un peralte sin optimizar de 60.00m y otro optimizado de 39.29m donde se tiene una variación porcentual del 34.51%, entonces de esta tabla se infiere, que a mayor longitud del puente el peralte optimo tendrá un mejor comportamiento (la variación porcentual entre un peralte optimizado y sin optimizar es mayor).

Discusión N°02: *¿Para qué valores de longitud del puente el volumen de concreto tiene un mejor comportamiento?*

De acuerdo a la **Tabla 33**, el método de optimización que mejores valores mínimos otorga es el método de la sección aurea. Ahora de acuerdo a esta tabla se tiene que a mayor longitud del puente el volumen de concreto optimizado c , así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene un volumen de concreto sin optimizar de 9.41m^3 y otro optimizado de 8.06m^3 donde se tiene una variación porcentual del 14.29%, mientras que para una longitud de 12.00m se tiene un volumen de concreto sin optimizar de 60.48m^3 y otro optimizado de 39.61m^3 donde se tiene una variación porcentual del 34.51%, entonces de esta tabla se infiere, que a mayor



longitud del puente el volumen de concreto optimo tendrá un mejor comportamiento (la variación porcentual entre un volumen de concreto optimizado y sin optimizar es mayor).

Discusión N°03: *¿Para qué valores de longitud del puente el área del encofrado tiene un mejor comportamiento?*

De acuerdo a la **Tabla 34**, el método de optimización que mejores valores mínimos otorga es el método de la sección aurea. Ahora de acuerdo a esta tabla se tiene que a mayor longitud del puente el área de encofrado optimizado otorga un mejor rango de variación porcentual, así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene un área de encofrado sin optimizar de 40.54m² y otro optimizado de 39.55m² donde se tiene una variación porcentual del 2.45%, mientras que para una longitud de 12.00m se tiene un área de encofrado sin optimizar de 125.28m² y otro optimizado de 116.83m² donde se tiene una variación porcentual del 6.74%, entonces de esta tabla se infiere, que a mayor longitud del puente el área de encofrado optimo tendrá un mejor comportamiento (la variación porcentual entre un área de encofrado optimizado y sin optimizar es mayor).

Discusión N°04: *¿Para qué valores de longitud del puente el peso del acero tiene un mejor comportamiento?*

De acuerdo a la **Tabla 35**, el método de optimización que mejores valores mínimos otorga es el método de la sección aurea. Ahora de acuerdo a esta tabla se tiene que a menor longitud del puente el peso del acero optimizado otorga un mejor rango de variación porcentual, a excepción para longitudes de 7.50m y 8.00m donde la variación porcentual es de -0.31 y -0.38, así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene un peso del acero sin optimizar de 0.99 Tnf y otro optimizado de 0.79 Tnf donde se tiene una variación porcentual del 20.19%, mientras que para una longitud de 12.00m se tiene un peso del acero sin optimizar de 5.32 Tnf y otro optimizado de 5.19 Tnf donde se tiene una variación porcentual del 2.48%, entonces de esta tabla se infiere, que a menor longitud del puente el peso del acero optimo tendrá un mejor comportamiento (la variación porcentual entre un peso del acero optimizado y sin optimizar es mayor).

Discusión N°05: *¿Para qué valores de longitud del puente el costo directo referencial tiene un mejor comportamiento?*

De acuerdo a la **Tabla 36**, el método de optimización que mejores valores mínimos otorga es el método de la sección aurea. Ahora de acuerdo a esta tabla se tiene que a mayor longitud del



puente el costo directo referencial optimizado otorga un mejor rango de variación porcentual, así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene un costo directo referencial sin optimizar de S/11,347.16 y otro optimizado de S/9,738.45 donde se tiene una variación porcentual del 14.18%, mientras que para una longitud de 12.00m se tiene un costo directo referencial sin optimizar de S/59,950.61 y otro optimizado de S/49,273.47 donde se tiene una variación porcentual del 17.81%, entonces de esta tabla se infiere, que a mayor longitud del puente el costo directo referencial óptimo tendrá un mejor comportamiento (la variación porcentual entre un costo directo referencial optimizado y sin optimizar es mayor).

Discusión N°06: *¿Cuál es el comportamiento de los parámetros de diseño (volumen de concreto y área de encofrado) respecto a la función objetivo (costo directo referencial), en puentes tipo losa de concreto armado?*

De acuerdo a la **Tabla 33**, **Tabla 34** y **Tabla 36**, se tiene que la variación porcentual de los parámetros de diseño (volumen de concreto y área de encofrado) respecto a la función objetivo (costo directo referencial) tienen un comportamiento directamente proporcional, así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene una variación porcentual del volumen de concreto de 14.29%, una variación porcentual del área de encofrado de 2.45% y una variación porcentual del costo directo referencial de 14.18%; para una longitud de 12.00m se tiene una variación porcentual del volumen de concreto de 34.51%, una variación porcentual del área de encofrado de 6.74% y una variación porcentual del costo directo referencial de 17.81%, entonces de esto se infiere, que si los valores de los parámetros de diseño (volumen de concreto y área de encofrado) aumentan, también la función objetivo (costo directo referencial) aumentará.

Discusión N°07: *¿Cuál es el comportamiento del peso del acero respecto a la función objetivo (costo directo referencial) en puentes tipo losa de concreto armado, optimizados?*

De acuerdo a la **Tabla 35** y **Tabla 36**, se tiene que la variación porcentual del parámetro de diseño (peso del acero) respecto a la función objetivo (costo directo referencial) tienen un comportamiento inversamente proporcional, así por ejemplo para una longitud de 4.00m se tiene una variación porcentual del peso del acero de 20.19% y una variación porcentual del costo directo referencial de 14.18%; para una longitud de 12.00m se tiene una variación porcentual del peso del acero de 2.48% y una variación porcentual del costo directo referencial de 17.81%; entonces de esto se infiere, que si los valores de los parámetros de diseño (peso del acero) aumentan, la función objetivo (costo directo referencial) disminuirá.



5.3. Comentario de la Demostración de la Hipótesis

Discusión N°01: *¿Los resultados obtenidos de un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar fueron los esperados?*

Si, se puede observar que en la mayoría de los resultados obtenidos de un diseño optimizado han permitido disminuir los valores de los parámetros de diseño de la función objetivo como el peralte, volumen del concreto, peso del acero y área del encofrado, y la función objetivo en sí (costo directo referencial), tal como se plantearon en nuestras hipótesis; con cierta excepción en el peso del acero, donde para luces de 7.50m y 8.00m los resultados obtenidos por optimización (optimizados) son ligeramente mayores (han aumentado) respecto a los sin optimizar.

Discusión N°02: *¿Por qué la función objetivo planteada para un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar es solamente la función costo directo referencial?*

En esencia cuando se habla de optimización, se habla de una función principal (función objetivo) que permita encontrar el valor óptimo dentro de un rango de valores, por tanto, nuestra investigación requiere de una función objetivo, eligiéndose al parámetro costo directo referencial, este parámetro contiene a su vez otras subfunciones como el volumen de concreto, área de encofrado y el peso del acero, que multiplicadas por sus respectivos costos unitarios conforman dicha función objetivo, es así que puedo determinar si un diseño sin optimizar respecto a otro optimizado es mayor o menor.

Discusión N°03: *¿Es posible que los parámetros como el volumen de concreto y área de encofrado optimizados respecto a otros sin optimizar otorgue valores mayores para puentes tipo losa de concreto armado?*

No, de acuerdo a los resultados obtenidos en nuestra investigación (ver **Tabla 33** y **Tabla 34**), para longitudes de puentes comprendidas entre 4.00 m y 12.00 m, la optimización matemática por los tres métodos analizados, paso constante, bisección y sección aurea (método que optimiza en un menor número de iteraciones), del volumen de concreto y área de encofrado respecto a otro sin optimizar, siempre nos resultan menores.

Discusión N°04: *¿Es posible que el parámetro peso total del acero optimizado respecto a uno sin optimizar otorgue valores mayores para puentes tipo losa de concreto armado?*



Sí, de acuerdo a los resultados obtenidos de la tabla 35, para longitudes de puentes de 7.50m y 8.00m, la optimización matemática por sección aurea del peso total del acero resultan ligeramente mayores en un 0.31% y 0.38% respectivamente, respecto a uno sin optimizar.

5.4. Aportes de la Investigación

La presente investigación a manera de aporte, plantea tablas comparativas de un diseño optimizado (ver **Tabla 48**) respecto a otro sin optimizar (ver **Tabla 47**) donde muestra los valores de la función objetivo (costo directo referencial) y sus parámetros de diseño y/o subfunciones (peralte, volumen de concreto, área de encofrado y peso del acero) para puentes tipo losa de concreto armado en longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, tomando como referencia y guía técnica al Manual de Puentes del MTC 2018.

La presente investigación ha permitido desarrollar un tipo de programación básica a través de algoritmos matemáticos sencillos en el software Maple versión 2015, dicha programación ha permitido crear una metodología tanto para un diseño sin optimizar y optimizado muy sencillo y práctico. El programa esta implementado para el análisis y diseño (de momentos flectores, fuerzas cortantes, deflexiones, áreas de acero, peraltes, volumen de concreto, área de encofrado, peso del acero, costo directo referencial, revisión por estado límite de servicio y fatiga) en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018 con longitudes de entre 4.00m y 12.00m, además presenta ciertas restricciones y/o limitaciones que pueden ser modificadas o adicionadas de acuerdo a nuevas características específicas de un puente.

La presente investigación a manera de aporte, plantea tablas comparativas de un diseño optimizado (ver **Tabla 27**) respecto a otro sin optimizar (ver **Tabla 26**) donde muestra los valores de los momentos flectores máximos de diseño por cargas vivas HL-93 (carga Tándem, carga de Camión, carga carril de diseño y carga viva más impacto) y cargas permanentes (carga muerta DC y DW), para puentes tipo losa de concreto armado en longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m.



La presente investigación a manera de aporte, plantea tablas comparativas de un diseño optimizado (ver **Tabla 29**) respecto a otro sin optimizar (ver **Tabla 28**) donde muestra los valores de las reacciones máximas de diseño por cargas vivas HL-93 (carga Tándem, carga de Camión, carga carril de diseño y carga viva más impacto) y cargas permanentes (carga muerta DC y DW), para puentes tipo losa de concreto armado en longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m.



Glosario

- ❑ **AASHTO LRFD:** Asociación Americana de Autopistas Estatales y Oficiales de Transporte. Los requisitos de diseño de estas Especificaciones emplean la metodología del Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD).
- ❑ **Acartelar:** Acción que consiste en aumentar, por una parte y otra parte, la sección de un elemento para aumentar la resistencia y dar rigidez a dicho elemento.
- ❑ **Ancho de Franja Equivalente:** Ancho de la sección de la losa con armadura principal paralelo al tráfico.
- ❑ **Algoritmos de búsqueda lineal univariantes:** O algoritmo de búsqueda secuencial, es un método que permite encontrar la función objetivo de una sola variable dentro de un conjunto de valores o lista de valores.
- ❑ **Barrera de protección:** Elemento de concreto armado cuyo propósito principal es contener y corregir la dirección de desplazamiento de los vehículos desviados que utilizan la estructura, por lo que deben resistir al choque. Brindan además seguridad al tráfico peatonal, ciclista y bienes situados en las carreteras y otras áreas debajo de la estructura.
- ❑ **Camión de diseño:** Diseño del vehículo que consta de tres ejes, delantero y dos ejes traseros con eje delantero con un peso 8kip (35 kN) y dos ejes traseros con un peso 32kip (145 kN). La distancia entre los ejes delantero y trasero es de 14 '(4,3 m) y la de los dos ejes traseros se puede variar entre el 14' (4,3 m) a 30 '(9,0m) para obtener el peor esfuerzo de cálculo. El neumático a distancia neumático en todos los ejes es de 6 pies (1,8 m).
- ❑ **Carga de carril de diseño:** La carga del carril de diseño consistirá en una carga de 0,64 klf (9.3 kN / m) distribuidos de manera uniforme en la dirección longitudinal. En dirección transversal, se supondrá que la carga de diseño del carril para ser distribuida uniformemente sobre un "ancho de 10,0 (3m).
- ❑ **Carga muerta:** Peso propio de todos los elementos no estructurales, tales como veredas, superficies de rodadura, balasto, rieles, durmientes, barandas, postes, tuberías, ductos y cables.
- ❑ **Calzada:** Ancho libre entre sardineles de veredas y/o elementos de protección, no será menor que el ancho del camino de acceso al puente el cual está constituido por el número de los carriles de circulación más las bermas. Deberá contener los siguientes



elementos: vías de tráfico, vías seguras, veredas, ciclovías, elementos de protección (barreras y barandas) y elementos de drenaje.

- ❑ **Cargas permanentes:** Aquellas que actúan durante toda la vida útil de la estructura sin variar significativamente, o que varían en un solo sentido hasta alcanzar un valor límite. Corresponden a este grupo el peso propio de los elementos estructurales y las cargas muertas adicionales tales como las debidas al peso de la superficie de rodadura o al balasto, los rieles y durmientes de ferrocarriles. También se consideran cargas permanentes el empuje de tierra, sobrecarga de tierra, la fricción superficial negativa, entre otros.
- ❑ **Cargas variables:** Son aquellas para las que se observan variaciones frecuentes y significativas en términos relativos a su valor medio. Las cargas variables incluyen los pesos de los vehículos y personas, así como los correspondientes efectos dinámicos, las fuerzas de frenado y aceleración, las fuerzas centrífugas, variaciones de temperatura, acciones de sismo y las acciones de viento.
- ❑ **Costo directo:** Suma de los costos de materiales, mano de obra, equipos, herramientas, y todos los elementos requeridos para la ejecución de una obra.
- ❑ **Deflexiones:** Grado en el que un elemento estructural se desplaza bajo la aplicación de una fuerza o carga. Se determina aplicando las leyes que relacionan las fuerzas y desplazamientos.
- ❑ **Diseño:** Dimensionamiento y detallado de los elementos y conexiones de un puente.
- ❑ **Diseño de puentes sin optimizar:** Metodología de análisis estructural en puentes tipo losa de concreto armado utilizando el método del ancho equivalente de franjas, que permite determinar parámetros de diseño como: Momentos flectores, fuerzas cortantes, deflexiones, áreas de acero, peraltes, volumen de concreto, área de encofrado, peso del acero, costo directo referencial, revisión por estado límite de servicio y fatiga.
- ❑ **Diseño de puentes con optimización:** Metodología de análisis matemático, aplicado al diseño de puentes sin optimizar tipo losa de concreto armado, que permite encontrar los valores óptimos (valores mínimos) de los parámetros de diseño de la función objetivo, dentro de un conjunto de valores.
- ❑ **Discretizar:** Proceso matemático que consiste en dividir un elemento en intervalos o partes, mediante el cual vamos a evaluar una función objetivo.
- ❑ **Estado Límite:** Condición más allá de la cual el puente o elemento deja de satisfacer los requisitos para los cuales fue diseñado.



- **Estado límite de evento extremo:** Estado límite de evento extremo, que garantice la supervivencia estructural del puente tras la actuación del sismo de diseño.
- **Estado límite de fatiga y fractura:** Estado límite de fatiga y fractura, que garantice una determinada tenacidad de fractura en el material; asimismo limitar el crecimiento de grietas bajo cargas consecuentes y prevenir la fractura del puente durante su vida de diseño.
- **Estado límite de resistencia:** Estado límite de resistencia, que garantice la resistencia y estabilidad local y global de la estructura bajo las combinaciones de carga especificadas.
- **Estado límite de servicio:** Estado límite de servicio, que garantice unas tensiones, deformaciones y ancho de grietas admisibles en todos los elementos bajo condiciones regulares de servicio.
- **Fuerza cortante:** Es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico. Se designa variadamente como T o V.
- **Función objetivo:** Es la ecuación que será optimizada dadas las limitaciones o restricciones determinadas y con variables que necesitan ser minimizadas o maximizadas usando técnicas de programación.
- **HL-93:** Es un tipo de carga vehicular teórico propuesto por la AASHTO en 1993. Se utiliza como la carga de diseño de estructuras viales en EE.UU. y otros países donde se sigue el código AASHTO. AASHTO HL-93 de carga viva vehicular es una combinación de tres diferentes cargas: HL-93 Diseño Camión (anteriormente, HS20-44 Truck), HL-93 Diseño en tándem (anteriormente, militar alternativo) y Diseño del carril de carga
- **Línea de influencia:** Representa la variación de las reacciones de momento o cortante en un punto específico de un miembro a medida que una fuerza concentrada se desplaza a lo largo del miembro. Una vez que esta línea es construida se puede determinar fácilmente cuál es la posición de la carga en la estructura que provocaría la mayor influencia en un punto especificado. Con ella podemos calcular la magnitud de los esfuerzos de momento y cortante, e incluso el valor de la deformación en ese punto.
- **Longitud del puente:** Proyección horizontal para designar la distancia que hay entre apoyos, que pueden ser los estribos.
- **Método de Bisección:** Método que encuentra el mínimo de una función en un intervalo de búsqueda. El intervalo se subdividido en dos intervalos iguales, y este a su



vez, se subdivide en otros dos intervalos iguales y así sucesivamente. La idea del método es la reducción progresiva de la región de búsqueda alrededor del mínimo.

- ❑ **Método de Paso Constante o Incremental:** Método más simple de la familia de los métodos de búsqueda unidimensional y surgió asociado al método de dirección de búsqueda univariante. La idea básica de este método de paso constante consiste en la elección de un incremento $\Delta\alpha$ de una determinada función.
- ❑ **Método de Sección Aurea:** Método que encuentra el mínimo de una función basada en tres puntos iniciales: dos considerados los extremos de un intervalo y el tercero entre los dos primeros de tal suerte que relación entre la distancia de este punto interno al extremo y la distancia entre los extremos es siempre una constante.
- ❑ **Momento Flector:** Es un momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de un prisma mecánico flexionado o una placa que es perpendicular al eje longitudinal a lo largo del que se produce la flexión.
- ❑ **Optimización:** Procedimiento que trata de encontrar valores que deben tener ciertas variables las cuales minimizan o maximizan una función, además esas variables deben satisfacer ciertas condiciones. La función que queremos maximizar o minimizar, se denomina función objetivo.
- ❑ **Peralte:** Dimensión que permite determinar la profundidad de una losa, cuando se tienen elementos de profundidad variable, los valores pueden ser ajustados para tomar en cuenta los cambios de rigidez relativa a momentos positivos y negativos.
- ❑ **Peso propio:** Peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales, actúan durante toda la vida útil del puente.
- ❑ **Precio unitario:** Cantidad o importe por unidad de un producto.
- ❑ **Puente:** Construcción que se levanta sobre una depresión del terreno (río, canal, foso, etc.) o en otro sitio para comunicar dos lados.
- ❑ **Puente losa:** Elemento estructural cuyo espesor es menor que sus otras dimensiones y sobre la cual, las cargas actuantes, incluido su peso propio, son perpendiculares a su plano medio, están compuestos principalmente de acero y concreto con determinadas características de resistencia.
- ❑ **Resistencia Nominal:** Resistencia de un elemento o conexión a las solicitaciones, según lo indicado por las dimensiones especificadas en la documentación técnica y por las tensiones admisibles, deformaciones o resistencias especificadas de los materiales
- ❑ **Revisión por Fatiga:** Para la revisión por fatiga se calcula con un camión de diseño ocupando una sola vía, con una separación de 9.14m entre los ejes posteriores, con una



carga de 14.52T. Para el cálculo no se aplica el factor de presencia múltiple, se considera un factor de impacto del 15%.

- ❑ **Revisión por fisuración:** Para la revisión por fisuración el concreto armado deberá soportar las cargas, en el estado límite de servicio, principalmente por medio de tensiones de compresión en el concreto y tensiones de tracción en las armaduras.
- ❑ **Superficie de rodadura:** Puede ser rígido o flexible y se dispone en la superficie superior del puente y accesos. El espesor de la superficie de rodadura se define en función al tráfico esperado en la vía.
- ❑ **Tablero:** Elemento estructural que soporta todas las cargas directas del puente, pueden diferenciarse en paralelos y perpendiculares al tráfico.
- ❑ **Tándem de diseño:** Constan de ejes dobles espaciados 4 '(1,2 m) de distancia, el peso de cada eje es 25kip (110 kN). La distancia entre los neumáticos de un eje es de 6 pies (1,8 m). Para obtener los máximos momentos negativos, un par de los tándems se debe considerar, espaciados a lo largo de 8.0m de 12.0m con la carga del carril de diseño para producir peor efecto de acaparamiento.



Conclusiones

Conclusión N°01

Se ha logrado verificar la hipótesis general **“La diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018 es que el optimizado disminuye el peralte, volumen del concreto, peso del acero, área del encofrado y el costo directo referencial ”**; tal como muestra la **Tabla 32** el peralte disminuye en promedio un 28.52% mediante la optimización por el método de la sección aurea; tal como muestra la **Tabla 33** el volumen de concreto disminuye en promedio un 28.58% mediante la optimización por el método de la sección aurea; tal como muestra la **Tabla 34** el área del encofrado disminuye en promedio un 5.15% mediante la optimización por el método de la sección aurea; tal como muestra la **Tabla 35** el peso del acero disminuye en promedio un 4.79% mediante la optimización por el método de la sección aurea y finalmente la función objetivo (costo directo referencial) tal como muestra la **Tabla 36** disminuye en promedio un 15.35% mediante la optimización por el método de la sección aurea, por tanto, se comprueba la hipótesis planteada. Se ha determinado incluir como método de optimización solo a la sección aurea, ya que esta otorga valores mínimos en un menor número de iteraciones y se adapta mejor a la función objetivo.

Conclusión N°02

Se ha logrado verificar la primera hipótesis específica **“La función objetivo para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es función únicamente del peralte de la losa que es directamente proporcional al costo directo referencial.”**; tal como muestran la **Tabla 36** y **Tabla 48** la función objetivo cuyo parámetro es el costo directo, es función únicamente del peralte de la losa, ya que está contenida de manera directa en los parámetros volumen de concreto, área de encofrado y peso del acero, en otras palabras la función objetivo depende solamente del peralte de la losa, lo que comprueba la hipótesis planteada.



Conclusión N°03

Se ha logrado verificar la segunda hipótesis específica **“La diferencia de peraltes entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.”**; de acuerdo al ítem 4.2. se evalúan tres métodos de optimización para el peralte, tal como muestra la Tabla 30 el peralte disminuye en promedio un 27.38% mediante la optimización por el método del paso constante, tal como muestra la tabla 31 el peralte disminuye en promedio un 25.19% mediante la optimización por el método de bisección, tal como muestra la Tabla 32 el peralte disminuye en promedio un 28.58% mediante la optimización por el método de la sección aurea. Por tanto, tomando en cuenta los valores optimizados tenemos que el método de la sección aurea otorga una mayor variación porcentual respecto a los otros métodos, esto debido a que dicho método da valores mínimos en un menor número de iteraciones y se adapta mejor a la función peralte de la losa, por tanto, se comprueba la hipótesis planteada.

Conclusión N°04

Se ha logrado verificar la tercera hipótesis específica **“La diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores”**; tal como muestra la Tabla 33 el volumen de concreto disminuye en promedio un 28.58% mediante la optimización por el método de la sección aurea respecto a otro sin optimizar, para longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, por tanto, se comprueba la hipótesis planteada.

Conclusión N°05

Se ha logrado verificar la cuarta hipótesis específica **“La diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores”**; tal como muestra la Tabla 35 el peso del acero disminuye en promedio un 4.79% mediante la optimización por el método de la sección aurea respecto a otro sin optimizar, para longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m; a



excepción para longitudes de 7.50m y 8.00m donde los valores optimizados aumentan ligeramente en -0.31% y -0.38% respectivamente respecto a otro sin optimizar, por tanto, no se comprueba la hipótesis planteada.

Conclusión N°06

Se ha logrado verificar la quinta hipótesis específica **“La diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores”**; tal como muestra la **Tabla 34** el área de encofrado disminuye en promedio un 5.15% mediante la optimización por el método de la sección aurea respecto a otro sin optimizar, para longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, por tanto, se comprueba la hipótesis planteada.

Conclusión N°07

Se ha logrado verificar la sexta hipótesis específica **“La diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.”**; tal como muestra la **Tabla 36** el costo directo disminuye en promedio un 15.35% mediante la optimización por el método de la sección aurea respecto a otro sin optimizar, para longitudes de 4.00m, 4.50m, 5.00m, 5.50m, 6.00m, 6.50m, 7.00m, 7.50m, 8.00m, 8.50m, 9.00m, 9.50m, 10.00m, 10.50m, 11.00m, 11.50m y 12.00m, por tanto, se comprueba la hipótesis planteada.



Recomendaciones

DE TEMAS NUEVOS DE INVESTIGACIÓN

Recomendación N°01

Se recomienda, implementar y complementar con otros métodos de optimización, como los métodos de interpolación cuadrática, método newton, entre otros. Considérese que nuestros métodos de optimización abordados (paso constante, bisección y sección aurea) han sido elegidos a conveniencia y criterio por el investigador por tratarse de algoritmos prácticos y sencillos en cuanto a su programación informática.

Recomendación N°02

Se recomienda, implementar y plantear otros métodos de optimización avanzada, como por ejemplo la optimización con restricciones, optimización multidimensional, optimización con algoritmos genéticos (algoritmos con inteligencia artificial), entre otros.

Recomendación N°03

Se recomienda, complementar y ampliar el estudio para puentes tipo losa de concreto armado de tramos continuos, siguiendo las mismas metodologías de optimización planteadas u otras metodologías similares, considérese que para cualquier modificación de la programación informática en el software Maple se tiene que tener en cuenta criterios básicos de programación matemática e informática.

Recomendación N°04

Se recomienda, implementar y ampliar el estudio para otros tipos de puentes, como por ejemplo puentes tipo alcantarilla, puentes tipo viga pre-esforzados o postensados (de concreto armado, metálicos, y/o mixtos), puentes tipo cajón (de concreto armado), puentes tipo arco (de concreto armado, metálicos, y/o mixtos), entre otros.

Recomendación N°05

Se recomienda, en cuanto a la programación matemática, programar en algún otro tipo de lenguaje más avanzado o de alto nivel como por ejemplo Java, C++, Python, entre otros;



considérese que nuestra programación la realizamos en el software Maple el cual posee un lenguaje básico y sencillo como es el C y Fortran.

PARA REPLICAR LA PRESENTE TESIS DE INVESTIGACIÓN

Recomendación N°06

Se recomienda antes de replicar la tesis revisar las restricciones y limitantes planteadas, ya que nuestra metodología posee características específicas de diseño (ver los datos de entrada o declaración de variables del ítem 3.5.2).

Recomendación N°07

Se recomienda antes de replicar la tesis, en el caso de determinar los parámetros de diseño manteniendo las restricciones y limitaciones originales de nuestro caso de estudio, para cualquier tipo de luz de entre 4.00m y 12.00m, solamente ubicar e introducir en el programa la longitud del puente en los datos de entrada y el tipo de metodología de optimización (revisar ítem 2.5.6).

EN GENERAL

Recomendación N°08

Se recomienda el uso de la **Tabla 26** y **Tabla 27**, para la determinación de los momentos flectores máximos de diseño por cargas vivas (HL-93) y cargas permanentes en un diseño sin optimizar por longitud del puente, para tramos simplemente apoyados.

Recomendación N°09

Se recomienda el uso de la **Tabla 28** y **Tabla 29**, para la determinación de las reacciones máximas de diseño por cargas vivas (HL-93) y cargas permanentes en un diseño sin optimizar por longitud del puente, para tramos simplemente apoyados.

Recomendación N°10

Se recomienda, antes de modificar o adicionar alguna variante al programa, revisar: las variables intervinientes, la secuencialidad de la programación, el diseño y planteamiento de



los algoritmos, comunicarse con el autor de la presente tesis para que puede facilitarle el programa.

Recomendación N°11

Se recomienda corroborar el análisis y diseño sin optimizar con otros métodos refinados y/o directos del manual de puentes del MTC o norma internacional.



Referencias

- AASHTO LRFD, A. A. (2017). *AASHTO LRFD, American Association of State Highway and Transportation Officials*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, A. A. (1996). *Standard Specifications for Highway Bridges*. Washington, D.C.: AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alcalá Gonzáles, J. (2009). *Optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados - Tesis Doctoral*. Valencia - España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Arias. (2006). *Metodología de la Investigación*.
- Bosio Velásquez, I. J. (1994). *Puentes Análisis Diseño y Construcción*. Lima - Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2ed.
- Bosmans, E. A. (2012). *Optimización de la disposición de las péndolas de un puente tipo arco enmallado de 92 metros - Tesis de Maestría*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Canale, S. C. (2007). *Métodos Numéricos para ingenieros*. México: Mc Graw Hill.
- Chile, U. d. (2012). *Lineas de Influencia - Análisis de estructuras isostáticas. Departamento de Ingeniería Civil- Universidad de Chile*.
- CivilGeeks. (25 de Junio de 2014). *Diseño de Puentes AASHTO*. Obtenido de CivilGeeks.com: file:///C:/Users/user/Downloads/Libro-de-Puentes-AASHTO%20(2).pdf
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGRAW-HILL (6ed).
- Hernandez, M. (s.f.). *Metodología de investigación. Marisol Hernández. ASESORÍA Maracaibo, Venezuela 04*. Obtenido de <http://metodologiadeinvestigacionmarisol.blogspot.pe/2012/12/tipos-y-niveles-de-investigacion.html>
- Infantes, M. M. (2016). *Estudio comparativo de técnicas de optimización para la actualización de modelos de elementos finitos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Loayza, S. J. (2002). *Optimización de estructuras aperticadas de concreto armado*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Lozada Campos, P. L. (2003). *Criterios de concepción y funcionalidad del proyecto de puentes*. Lima: CISMID .
- Manrique, E. S. (2004). *Guía para el diseño de puentes con vigas y losas*. Piura: Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura.



- Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, M. 2. (2018). *Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, MTC 2018*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Martí, J. &. (2013). Diseño Automático de tableros óptimos de puentes de carreteras de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos. Artículo de Investigación. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
- Martinez, A. (2006). *Investigacion*.
- Menezes, I. F. (2011). *Programación Matemática*. Rio de Janeiro: Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro.
- MTC, M. d. (2018). *Manual de Puentes MTC*. Liima - Perú: Ministerio de Transportes del Perú.
- Mundo, M. d. (29 de Noviembre de 2013). *espanol.mapsofworld.com*. Obtenido de <https://espanol.mapsofworld.com/continentes/sur-america/peru/latitud-y-longitud-de-peru.html>
- Osman, I. H. (1996). *Meta - Heuristics: Theory & Applications*. Boston - London - USA: Kluwer Academic Publishers.
- Ramirez Coria, P. E. (2010). *Apoyo Didáctico en la Asignatura de Puentes CIV 312*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.
- Ramos García, H. K. (2010). *Manual Práctico para el Pre-dimensionamiento de puentes de acero y concreto, para una luz menor a 15 metros*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Ramos, E. (s.f.). *Metodos y tecnicas de investigacion*. Obtenido de <http://www.gestiopolis.com/metodos-y-tecnicas-de-investigacion/>
- Saila, D. d.-M. (18 de Agosto de 2019). *Teoria de Estructuras - Líneas de Influencia en estructuras isostáticas*. Obtenido de Teoria de Estructuras - Líneas de Influencia en estructuras isostáticas: https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/9582/mod_resource/content/1/tema_3_LINEAS_DE_INFLUENCIA.pdf
- Seminario Manrique, E. (2004). *GUÍA PARA EL DISEÑO DE PUENTES*. Piura: Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura .
- Serquén, A. R. (2016). *Puentes con AASHTO LRFD 2014*. Lima.
- Supo, J. (s.f.). *Seminario de investigacion*. Obtenido de <http://seminariosdeinvestigacion.com/niveles-de-investigacion/>



Vallecilla B., C. R. (2008). *Construcción de líneas de influencia en vigas continuas y marcos indeterminados*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.



Anexos

Tabla 37. Matriz de consistencia

"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN DISEÑO OPTIMIZADO RESPECTO A UNO SIN OPTIMIZAR EN PUENTES TIPO LOSA DE CONCRETO ARMADO USANDO EL MÉTODO DEL ANCHO EQUIVALENTE DE FRANJAS DEL MANUAL DE PUENTES MTC 2018"						
	PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN O NIVEL	INDICADORES
GENERAL	¿Cuál es la diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Evaluar la diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	La diferencia entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018 es que el optimizado disminuye el peralte, volumen del concreto, peso del acero, área del encofrado y el costo directo referencial	Diseño de puentes con Optimización	Peralte Volumen del Concreto Peso del Acero Área del Encofrado Costo Directo Referencial	Altura (m) Volumen (m ³) Peso (Tonf) Área (m ²) Costo (soles)
				Diseño de puentes sin Optimización		
	Problema específico 01. ¿Puede la función objetivo ser función solamente del costo directo para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Objetivo específico 01. Determinar la función objetivo para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	Hipótesis específica 01. La función objetivo para un diseño con optimización en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es función únicamente del peralte de la losa que es directamente proporcional al costo directo referencial	Función Objetivo	Peralte	Costo (soles)
	Problema específico 02. ¿Cuál es la diferencia de peraltes entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Objetivo específico 02. Calcular la diferencia de peraltes entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	Hipótesis específica 02. La diferencia de peraltes entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.	Peralte	Peralte	Altura (m)



ESPECÍFICOS	Problema específico 03. ¿Cuáles la diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Objetivo específico 03. Calcular la diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	Hipótesis específica 03. La diferencia del volumen total del concreto entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.	Volumen total del concreto	Volumen de concreto	Volumen (m ³)
	Problema específico 04. ¿Cuáles la diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Objetivo específico 04. Calcular la diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	Hipótesis específica 04. La diferencia del peso total del acero entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.	Peso total del acero	Peso del acero	Peso (Tonf)
	Problema específico 05. ¿Cuáles la diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Objetivo específico 05. Calcular la diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	Hipótesis específica 05. La diferencia del área total del encofrado entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.	Área total del encofrado	Área del encofrado	Área (m ²)
	Problema específico 06. ¿Cuáles la diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018?	Objetivo específico 06. Calcular la diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018.	Hipótesis específica 06. La diferencia del costo directo referencial entre un diseño optimizado respecto a uno sin optimizar en puentes tipo losa de concreto armado usando el método del ancho equivalente de franjas del Manual de Puentes MTC 2018, es que el optimizado da valores menores.	Costo Directo Referencial	Costo Directo	Costo (S/.)