

AÑO DE LA CONSOLIDACIÓN DEL MAR DE GRAU

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA

(Creada por Ley N° 25265)



FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL - HUANCAMELICA

TESIS

**"TÉCNICA DE PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA
SECUENCIAL (SQP) PARA OBTENER LA
OPTIMIZACIÓN DE VIGAS PRINCIPALES DE PUENTES
TIPO ARCO DE CONCRETO ARMADO"**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

INGENIERÍA ESTRUCTURAL

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

FELIPE INCA, Leopoldo Adolfo

ASESOR:

Ing. AYALA BIZARRO, Iván Arturo

CO ASESOR:

Lic. ALCÁNTARA ESPINOZA, Eleuterio Martín

HUANCAMELICA - PERÚ

2016



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el Auditorium de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, a los 21 días del mes de enero del año 2016, a horas 4:30 p.m, se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los siguientes: **Ing. Marco Antonio LÓPEZ BARRANTES (PRESIDENTE)**, **Arq. Abdón Dante OLIVERA QUINTANILLA (SECRETARIO)**, **Ing. Omar CABALLERO SÁNCHEZ (VOCAL)**, designados con Resolución de Consejo de Facultad N° 202-2014-FCI-UNH, de fecha 16 de junio del 2014, aprobación del proyecto de investigación de tesis con la Resolución de Consejo de Facultad N° 438-2014-FCI-UNH, de fecha 07 de noviembre del 2014 y ratificados con Resolución de Decano N° 004-2016-FCI-UNH de fecha 18 de enero del 2016, a fin de proceder con la evaluación y calificación de la sustentación del informe final de tesis titulado: "TÉCNICA DE PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA SECUENCIAL (SQP) PARA OBTENER LA OPTIMIZACIÓN DE VIGAS PRINCIPALES DE PUENTES TIPO ARCO DE CONCRETO ARMADO", presentado por los Bachiller **Leopoldo Adolfo FELIPE INCA**, para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**; en presencia del **Ing. Iván Arturo AYALA BIZARRO**, Asesor y el **Lic. Eleuterio Martin ALCÁNTARA ESPINOZA** como Co-Asesor del presente trabajo de tesis. Finalizado la evaluación a horas ~~4:30 p.m~~ ^{6:30 p.m} se invitó al público presente y al sustentante abandonar el recinto. Luego de una amplia deliberación por parte de los Jurados, se llegó al siguiente resultado:

APROBADO POR... Unanimidad

DESAPROBADO

En señal de conformidad, firmamos a continuación:



 Presidente



 Secretario



 Vocal



 N° B° Decano (e)

A mi madre, por su apoyo incondicional y su empeño de sacarnos adelante, gracias a tu vigor y consecuente trabajo el de educarnos deseando lo mejor para nosotros tus hijos.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor, por guiarme en el tema en general y encaminarme con las nociones y pautas de mi proyecto de tesis, también a aquellos docentes del curso de investigación que aportaron y me ayudaron a resolver mis controversias con respecto a mi tema en particular.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRAC	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO 1.	1
PROBLEMA.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA	3
1.3. OBJETIVO: GENERAL Y ESPECÍFICOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN	4
CAPÍTULO 2.	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. ANTECEDENTES	6
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	6
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	10
2.2. BASES TEÓRICAS	11
2.2.1. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	11
2.2.2. DISEÑO DE COSTO ÓPTIMO.....	24
2.3. HIPÓTESIS	55

2.4.	VARIABLES DE ESTUDIO.....	55
2.4.1.	VARIABLE INDEPENDIENTE:.....	55
2.4.2.	VARIABLE DEPENDIENTE:.....	56
2.5.	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	56
2.5.1.	ALCANCES.....	56
2.5.2.	LIMITACIONES.....	57
CAPÍTULO 3.	58
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	58
3.1.	ÁMBITO DE ESTUDIO.....	58
3.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	58
3.3.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	58
3.4.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	59
3.5.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	59
3.6.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	59
3.6.1.	POBLACIÓN.....	59
3.6.2.	MUESTRA.....	60
3.6.3.	MUESTREO.....	60
3.7.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	60
3.8.	PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	61
3.9.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	61
3.9.1.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO.....	61
3.9.2.	ANÁLISIS DE DATOS.....	61
CAPÍTULO 4.	63
RESULTADOS.....	63
4.1.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	63
4.1.1.	PROCEDIMIENTO SENCILLO PARA OPTIMIZACIÓN DE UNA VIGA EN ARCO DE CONCRETO ARMADO.....	63
4.1.2.	PREDIMENSIONADO Y GEOMETRÍA.....	64
4.1.3.	RESULTADOS DE SOLICITACIONES INTERNAS CON EL SAP 2000.....	65
4.1.4.	CONSTRUCCIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	71
4.1.5.	RESULTADOS Y GRÁFICAS CON EL SQP.....	72
4.1.6.	CORRECCIÓN Y ECUACIÓN DE TENDENCIA PARA EL PERALTE.....	77

4.1.7.	VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO.....	81
4.1.8.	RESULTADOS DEL COSTO DE LA VIGA ARCO.....	83
4.1.9.	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	87
4.2.	DISCUSIÓN.....	89
	CONCLUSIONES.....	92
	RECOMENDACIONES.....	93
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	94
	ARTÍCULO CIENTÍFICO.....	97
	ANEXOS.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de algoritmos del MATLAB.....	17
Tabla 2. Combinaciones de Carga y Factores de Carga	39
Tabla 3. Factores de Carga para Cargas Permanentes.....	40
Tabla 4. Incremento por Carga Dinámica IM.....	41
Tabla 5. Valores de K para longitud efectiva de nervaduras de arco	43
Tabla 6. Dimensiones e Indicadores de la Variable Dependiente	56
Tabla 7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	61
Tabla 8. Peralte de la viga arco para el diseño de Arcos Primarios	64
Tabla 9. Envolvente para el requerimiento RESISTENCIA I con el SAP-2000	68
Tabla 10. Parámetros de costo por metro lineal de viga tipo arco	71
Tabla 11. Valores del cálculo para un diseño Tradicional.	72
Tabla 12. Salida de los resultados para un diseño con SQP.	77
Tabla 13. Valores de resumen para ecuaciones de tendencia.....	79
Tabla 14. Valores finales de diseño para una viga en arco de concreto armado.	79
Tabla 15. Valores finales para el peralte "e" de la viga arco.	81
Tabla 16. Tabla para límites de deflexión y/o desplazamientos verticales.....	81
Tabla 17. Costos de diseño y estribamiento con acero de refuerzo lateral	84
Tabla 18. Costo de la viga en arco y metrados totalizados.	85
Tabla 19. Contraste de los costos cuantitativos y ahorro.....	86
Tabla 20. Prueba de diferencia de medias entre la optimización del Diseño Tradicional y la Técnica SQP	88
Tabla 21. Porcentaje de Ahorro con la Técnica SQP	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de función de 03 dimensiones para minimización.....	18
Figura 2. Proceso de diseño prueba y error.....	25
Figura 3. Proceso de Diseño Optimizado.....	26
Figura 4. Características del camión de diseño.....	29
Figura 5. Elementos principales de una viga arco.....	32
Figura 6. Clasificación de acuerdo a sus articulaciones.....	34
Figura 7. Clasificación según la disposición del tablero.....	34
Figura 8. Sección típica de la viga tipo arco.....	44
Figura 9. Análisis de viga arco corta de sección rectangular.....	45
Figura 10. Geometría del Arco Primario para una constante de arco $K=0.10$	65
Figura 11. Líneas de influencia para el FRAME 01 para Axial, Momento y Cortante.....	66
Figura 12. Líneas de influencia para el FRAME 20 para Axial, Momento y Cortante.....	67
Figura 13. Gráfica de Fuerzas Axiales, Momentos Flectores y Fuerzas Cortantes.....	70
Figura 14. Salida de los resultados con el SQP del Matlab.....	73
Figura 15. Salida del SQP para el punto actual de las variables.....	74
Figura 16. Salida del SQP para el contador de las funciones evaluadas.....	75
Figura 17. Variación de la función objetivo en cada iteración.....	75
Figura 18. Máximos valores de violación de las restricciones.....	76
Figura 19. Medida del error en cada paso por iteración.....	76
Figura 20. Ecuación para la tendencia Polinómica de 3er grado.....	78
Figura 21. Ecuación para la tendencia logarítmica.....	78
Figura 22. Ecuación para el peralte de viga en arco de concreto armado.....	80
Figura 23. Desplazamientos verticales con el programa SAP2000 para la viga tipo arco según los requerimientos de RESISTENCIA I del LRFD-2012.....	82
Figura 24. Contraste de resultados método tradicional VS método con SQP.....	86
Figura 25. Relación entre la ubicación de la sección y porcentaje de ahorro.....	89
Figura 26. Contrastación de costos con el método tradicional y el SQP.....	90

RESUMEN

En estos años de avance computacional y tecnológico se ha visto una mejora extraordinaria de una rama de la ingeniería llamada "optimización estructural" para la resolución de los problemas de diseño estructural de cuales se plantean plataformas en base a una o varias funciones objetivo. Del mismo modo en estos últimos años, para realizar un diseño estructural hacia falta de mucha pericia por parte del ingeniero proyectista y como también le demandaba mucho tiempo en el diseño en mayor parte en los ciclos del proceso iterativo del cálculo.

En lo referente a la optimización estructural he planteado una metodología para realizar un Diseño de Costo Óptimo (DCO) para vigas principales de un puente tipo arco de concreto armado con respecto a las solicitaciones de carga requeridas y de acuerdo con la normatividad del ACI 318S-11 y del AASHTO LRFD-2012, todo ello mediante el uso de la minimización matemática de la función objetivo del costo de nuestra estructura, esta función comprende la suma de los costos reales de las partidas de concreto, el acero estructural, el encofrado y desencofrado incluido los costos de mano de obra para dichas partidas.

El programa MATLAB R2013a cuenta con muchos algoritmos ya desarrollados y resueltos como es para el caso de la optimización, dentro de sus librerías de "Optimization Toolbox" se tiene acceso a muchas técnicas de programación lineal y no lineal, de los cuales en nuestro caso particular se utilizó la minimización matemática con la función "fmincon" y por consiguiente el método de resolución es el algoritmo de Conjunto Activo (Active Set) o método de Programación Cuadrática Secuencial (SQP). Para la obtención del DCO de nuestro problema en particular, se realizó mediante la estructuración e implementación de la técnica de SQP, también se hizo una contrastación para la verificación de los resultados en referencia a un diseño tradicional.

El problema que se logró solucionar aplicando la técnica del SQP y como ejemplo he tomado el proyecto denominado "Instalación del Puente Vehicular Alberto Benavides de la Quintana Sobre el Río Ichu del Barrio de San Cristóbal, Distrito de Huancavelica, Provincia de Huancavelica – Huancavelica" (Puente Integración), donde se pudo apreciar en comparación a un diseño tradicional los ahorros significativos del costo para la viga principal en arco que fueron: en un 30% para el arranque de la viga, un 23% a L/4 de la viga y un 37% en la clave del mismo, finalmente obteniendo un ahorro promedio del 29% con un margen de error de +/- 10% en cada estación de la viga; por tanto concluyo que el DCO es una metodología económicamente viable para cualquier tipo de diseño estructural u obra civil en general.

ABSTRAC

In these years of advance computational and technological one has seen an extraordinary improvement of a branch of the called engineering "structural optimization" for the resolution of the problems of structural design of which think about platforms based on an or several functions objective. In the same way in these last years, to carry out a structural design toward lack of a lot of know-how on the part of the engineer planner and as well as it demanded him a lot of time in the design in more part in the cycles of the process iterative of the calculation.

Regarding the structural optimization I have outlined a methodology to carry out a Design of Cost Optimal (DCO) for main beams of a bridge type arch of armed concrete with regard to the required load solicitations and in accordance with the norms of the ACI 318S-11 and of the AASHTO LRFD-2012, everything it by means of the use of the mathematical minimization of the objective function of the cost of our structure, this function understands the sum of the real costs of the departures of concrete, the structural steel, the formwork and formwork release included the manpower costs for this departures.

The program MATLAB R2013a already has many algorithms developed and resolved as it is for the case of the optimization, inside its bookstores of "Optimization Toolbox" one has access to many techniques of lineal programming and not lineal, of which in our particular case the mathematical minimization was used with the function "fmincon" and consequently the resolution method is the algorithm of (Active Set) or method of Sequential Quadratic Programming (SQP). For the obtaining of the DCO of our problem in particular, was carried out by means of the structuring and implementation of the technique of SQP, a contrast was also made for the verification of the results in reference to a traditional design.

The problem that was possible to solve applying the technique of the SQP and as example I have taken the denominated project "Installation of the Vehicular Bridge Alberto Benavides of the Quintana On the River Ichu of San Cristóbal's Neighborhood, District of Huancavelica, County of Huancavelica - Huancavelica" (Bridge Integration), where you could appreciate in comparison to a traditional design the significant savings of the cost for the main beam in arch that they were: in 30% for the outburst of the beam, 23% to L/4 of the beam and 37% in the key of the same one, finally obtaining a saving average of 29% with an error margin of + / - 10% in each station of the beam; therefore I conclude that the DCO is an economically viable methodology for any type of structural design or civil work in general.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación muestro una metodología para la obtención de un Diseño de Costo Óptimo (DCO), mediante la estructuración e implementación de la técnica de Programación Cuadrática Secuencial (SQP) del Matlab R2013a, en rigor a las normas y reglamentos como es el caso del ACI-318S-11 y el AASHTO LRFD-2012 para el diseño de la viga principal de puentes tipo arco de concreto armado. Como ya es sabido existen muchos diseños estructurales sobredimensionados o demasiado conservadores y por tanto son deficientes con respecto a un Diseño de Costo Óptimo, esto ya sea a la falta de actualización y el uso de herramientas necesarias por parte del ingeniero proyectista para conseguir la optimización de dichas estructuras.

Anteriormente para realizar diseños de elementos estructurales el proyectista requería de mucha experiencia para realizar tanto el diseño inicial (predimensionamiento) y análisis de acuerdo a las leyes físicas, todo esto tomando en cuenta si el diseño es válido de acuerdo a la normatividad y solicitaciones estructurales para finalmente obtener un diseño final. Con la utilización de herramientas como la Programación Cuadrática Secuencial (SQP) algoritmos de minimización matemática no lineal, podemos obtener eficientemente diseños óptimos en cuanto a estructura y costo, gracias a los procesos iterativos que el computador determina en función a las solicitaciones de la estructura.

En la actualidad encontrar el punto de equilibrio entre la seguridad máxima y costo mínimo, ya no son contradictorios puesto que con la búsqueda de funciones mínimas múltiples con restricciones hacen que estas se solucionen gracias al computador, permitiendo así al diseñador tomar más tiempo en los modelos estructurales y mas no así en el cálculo iterativo de estas. Un problema concreto que se llegó a solucionar en nuestra región de Huancavelica es el "Puente Integración" los cuales consta de una luz total del vano de 99.90 m con una luz libre del vano central de 74.00 m y con una flecha de 14.80 m,

El autor.

CAPÍTULO 1.

PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

E. Torroja nos manifiesta:

“El arco es el mayor invento tensional del arte clásico. El sigue impresionando al vulgo, y la Humanidad ha tardado mucho en acostumbrarse a su fenómeno resistente; prueba de ello es la frecuencia con que la leyenda achaca al diablo su construcción... si la columna es arquitectura pura, el arco es Ingeniería; o mejor dicho, el arco es técnica... las predilecciones del Arte han sido para el arco; ese arco que nunca duerme, según reza el proverbio árabe... ese arco que, en su encorvamiento vuela sobre el vano y da la sensación de algo más dramáticamente tensional que la columna... va siempre unido a la Idea de esfuerzo por resistir, de salto por dominar la distancia” (1)

La necesidad de realizar diseños completos y complejos en cuanto a alternativas técnicas y economía dentro de estructuras como son los puentes con forma de arco, es hasta ahora un gran problema que a falta de herramientas y tecnología ya existentes todavía se hacen diseños que siguen categorizados dentro del marco tradicional, además la falta de actualización es mucho más frecuente ya que no permite al profesional el uso de innumerables herramientas como algoritmos digitales que ofrecen técnicas diferentes que se encuentran en el mercado como es el caso del SQP (Optimtool del Matlab) y otros que ya están disponibles como instrumentos de programación en el ámbito de la optimización.

Lozano, Velásquez y Cepeda nos aclaran:

“En la actualidad la optimización es un proceso que tiene grandes aplicaciones, con lo cual se logra un gran mejoramiento de procesos y productos que, por tanto, dan lugar a reducción de costos, tiempos, etc. En este sentido, la optimización es un proceso a través del cual se busca obtener o determinar la

mejor solución posible, de entre un grupo de resultados, que a su vez satisface las restricciones que presenta el sistema al cual se aplica” (2)

En nuestro medio se carecen de estructuras como son los puentes en forma de arco, tal vez porque suponen mayor presupuesto en su ejecución, más tiempo, mucho material y por ende mayor cantidad de personal e incluso mayor nivel de estudio por lo que se opta generalmente por estructuras en puentes con forma de viga y losa en su totalidad; lo que significa que es una alternativa poco adecuada para obtener puentes arquitectónicos, elegantes, atractivos, relevantes, estéticos, etc.; que a diferencia del puente en forma de arco sumado con la técnica de la optimización y ceñidos a las restricciones que las normas nos implantan se lograrían puentes con grandes luces sin problema alguno además con un gran impacto para la sociedad sin necesidad de mayor gasto, tiempo y otros factores.

El fundamento de un puente según MOLLO es:

“integrar las carreteras, esto es diseñar y construir puentes de gran magnitud; El puente tendrá efectos económicos, pero también trae consigo otros beneficios; mejoraría el sector salud, la educación se extendería, se mejorarían las condiciones de vivienda y llegarían mayores turistas. Y respecto al puente en arco dice: muchas veces las condiciones del terreno no permite tener apoyos Intermedios, con la construcción del puente en arco resolvemos este problema, además favorece a la vinculación caminera” (3)

De este modo utilizado puentes en forma de arco más técnicas de optimización y regidos por las normas vigentes se propone el uso de la técnica de programación Cuadrática Secuencial (SQP) como herramienta para el diseño del mismo.

Lapadula califica al SQP como:

“La programación cuadrática secuencial es una técnica de optimización clásica basada en el cálculo del gradiente de la función objetivo y de las restricciones. Se puede decir que la técnica se divide en dos sub-problemas de optimización, uno para determinar la dirección de búsqueda, y otro para calcular el paso de una iteración a otra. Su nombre se debe a que en cada iteración, se resuelve un problema cuadrático, el cual se establece en función del gradiente de la función objetivo y de las restricciones” (4)

La Programación Cuadrática Secuencial juega un papel muy relevante en la teoría de optimización cuya aplicación trae grandes beneficios por ser uno de los algoritmos clásicos de convergencia inmediata más usado, esto tanto para la cuestión de diseño óptimo y construcción de estructuras de puentes en forma de arco, además dicho sea de paso el puente tipo arco de concreto armado mejora el entorno urbano, la calidad de vida y la economía de los habitantes.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta el planteamiento del problema se planteó la siguiente interrogante: ¿En qué medida la aplicación de la Programación Cuadrática Secuencial (SQP) incide en la optimización por diseño de costo mínimo en las secciones transversales de la viga principal en un puente tipo arco de concreto armado?

1.3. OBJETIVO: GENERAL Y ESPECÍFICOS

1.3.1.OBJETIVO GENERAL

Determinar en qué medida la aplicación de la Programación Cuadrática Secuencial (SQP) incide en la optimización por diseño de costo mínimo en las secciones transversales de la viga principal en un puente tipo arco de concreto armado.

1.3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el algoritmo del SQP para el diseño de costo mínimo, en función a las normas vigentes.
- Determinar las dimensiones de la sección transversal de la viga principal antes y después del uso de la Programación Cuadrática Secuencial.
- Determinar cuánto es el costo de las secciones transversales de la viga principal antes y después del uso de la Programación Cuadrática Secuencial.
- Evaluar la eficacia de la Programación Cuadrática Secuencial como técnica para la optimización de costos.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad es muy común el uso de varios tipos de puentes para salvar distintos obstáculos. De estos puentes, los más comunes y sencillos en nuestro medio son los puentes tipo losa y vigas losa de concreto armado, lo cual indica que no es muy frecuente la selección de los puentes del tipo arco de concreto armado como opción de diseño y ejecución.

Para la selección del puente por el tipo de topografía Seminario señala que:

"... las obras de arte deben incorporarse al trazado de una manera fluida y natural, así éstas debe ser compatible con la geometría del accidente topográfico que obliga la construcción de la estructura" ⁽⁵⁾

También para la selección del puente existe la necesidad de plantear un tipo de estructura con un gálibo que esté por encima del Nivel Máximo de Aguas esto determinado por un estudio hidrológico para una determinada cuenca y un periodo de retorno, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) nos recomienda:

"En puentes sobre cursos de agua, se debe considerar como mínimo una altura libre de 1.50 m a 2.50 m sobre nivel máximo de las aguas." ⁽⁶⁾

Hablando de los puentes tipo arco este permite resolver el problema del gálibo mínimo por factores del estudio hidrológico y topografía puesto que son muy accesibles para su adaptación en nuestro medio, aunque suponen mayor costo y tiempo, y por ello se plantea un método mediante la estructuración e implementación de la Técnica de Programación Cuadrática Secuencial (SQP) para lograr un Diseño de Costo Óptimo (DCO) de la viga principal de un puente tipo arco de concreto armado.

La Programación Cuadrática Secuencial (SQP) es un método popular considerado ser efectivo y confiable para resolver problemas con restricciones de igualdad y desigualdad, cuya función es minimizar los costos en función de sus restricciones; además de ser considerado como una técnica clásica basada en el cálculo diferencial. En este trabajo se presenta un modelo de diseño óptimo de vigas en arco de concreto reforzado, el cual trata de minimizar el costo de una viga considerando no sólo los

esfuerzos permisibles por el elemento estructural, sino también los costos del concreto, el acero y el encofrado.

Este proceso consiste en hallar los valores de las variables involucradas con el fin de cumplir unos requisitos de funcionalidad, estética, resistencia y economía en comparación con los métodos tradicionales que resultan ser muy tediosos.

Lapadula afirma respecto al proceso de optimización que:

"... la optimización tiene la ventaja de que el procedimiento de cambiar valores de las variables lo hace un algoritmo matemático, lo cual permite comparar muchas alternativas en corto tiempo. En cambio en el diseño tradicional, el diseñador podrá comparar 2 ó 3 alternativas, y sin tener la certeza de que el diseño escogido sea el mejor.

El diseño estructural busca determinar las propiedades de los elementos (Secciones transversales, materiales, etc.) con el fin de que cumplan unos requisitos de funcionalidad y resistencia" (4)

Esto supone alcanzar los requisitos de funcionalidad y resistencia en el menor tiempo y con menor costo.

La investigación planteada contribuirá a generar el conocimiento y uso de un determinado procedimiento de optimización de estructuras como puentes tipo arco de concreto armado, los cuales son viables aprovechando nuestra geografía y dar al ingeniero una herramienta de cómputo que ayude a realizar la búsqueda de diseños estructurales convenientes con grandes luces que sean resistentes, económicos y estéticos, lo que contribuirá al desarrollo de la sociedad en diferentes aspectos.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Un antecedente internacional e histórico de acuerdo a Demchenko menciona que:
"Los puentes arco se conocen desde la más remota antigüedad y aparecen restos arqueológicos de arcos de piedras desde los Sumerios en Mesopotamia, 2,000 a.c. el puente existente más viejo del arco es posiblemente Mycenaean Puente de Arkadiko en Grecia a partir de cerca de 1,300 a.c.

Parece haber un cierto consenso que fueron en Europa los Etruscos en Italia, quienes usaron por primera vez el verdadero arco sobre el año 800 a.c. Aunque en verdad los arcos eran conocidos ya por Etruscos y Griegos, los Romanos fueron - como con la cámara acorazada y la bóveda – los primeros para realizar completamente el potencial de los arcos para la construcción del puente." (7)



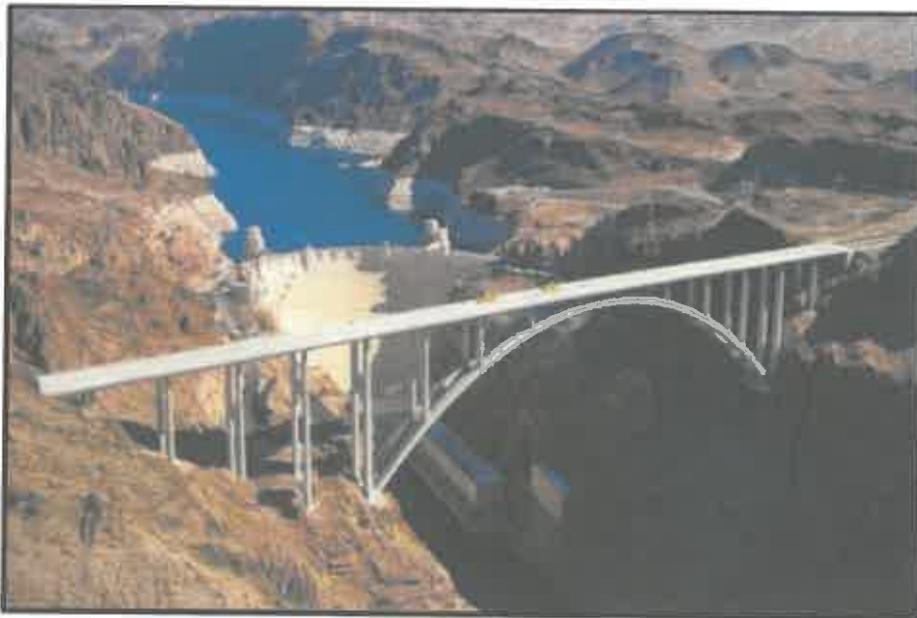
Fotos 1. Mycenaean Puente de Arkadiko.



Fotos 2. Puente Romano de Mérida.

El arco es un elemento estructural que mejor se comporta en lugar de vigas simplemente apoyadas de gran luz y que permite transmitir todos los esfuerzos transmitidos a esfuerzos de compresión. Además constituye el desarrollo más reciente de los puentes de arco clásico. Desde el punto de vista estético, surgen como consecuencia de las nuevas demandas arquitectónicas exigidas a los puentes en entornos urbanos,... estructuras en arco resultan las más adecuadas para sostener tableros planos y curvos.

Uno de los ejemplos de construcción más imponente es el proyecto de desviación de la Presa Hoover 2010, ubicado entre Arizona y Nevada de los Estados Unidos, es considerado uno de los puentes de concreto más grande del mundo con una longitud total de 579 metros, con un vano central de 320 metros de luz y 270 metros de altura sobre el nivel del Río Colorado y con un costo de inversión de 114 millones de dólares.



Fotos 3. Puente Mike O'Callaghan - Pat Tillman Memorial.

Coello Coello, Santos Hernández, Alonso Farrera, con referencia a las metodologías de optimización cita:

“El proceso tradicional de diseño en Ingeniería suele ser muy tedioso: basado en la información que posee sobre el problema en estudio, el

ingeniero propone un diseño inicial, el cual es posteriormente corroborado mediante las técnicas de análisis matemático disponible. Si el diseño es válido, entonces se adopta, y si no lo es, se procede a modificar ciertos parámetros del diseño y se vuelve a analizar. En este proceso de ensayo y error es donde el Ingeniero gana experiencia, si bien es a un precio muy alto en términos de tiempo y esfuerzo. Debido a que el tiempo es siempre una limitante en el mundo real, suele adoptarse una solución sub-óptima en la mayor parte de los casos. El advenimiento de la computadora ha hecho posible ayudar a los ingenieros a automatizar este proceso. Sin embargo, su uso se ha concentrado principalmente en efectuar los tediosos cálculos matemáticos que se requieren, pero no en el proceso de diseño en sí.” (8)

Por otro lado, en los últimos años ha cobrado gran impulso una rama de la ingeniería conocida como "optimización", en la cual los problemas de diseño se reformulan en base a una o más funciones objetivo, la cual se quiere minimizar o maximizar, mientras se le sujeta a una serie de restricciones. Técnicas de programación matemática suelen ser la herramienta básica de los ingenieros que trabajan en esta área, y un gran número de heurísticas se han desarrollado para enfrentar la alta no linealidad y no-convexidad de la mayoría de los problemas de diseño, que se caracterizan por tener un gran número de mínimos locales.

Respecto a las edificaciones, la gran mayoría de los artículos publicados tratan sobre vigas.

Tomás y Martí (2009) optimizaron la cantidad de refuerzo de acero en elementos finitos de placas y cáscaras de hormigón con ayuda del módulo de optimización del software ANSYS.

“Borda y Rodríguez (2010) aplicaron los algoritmos SQP y de Punto Interior del “Optimization Toolbox” de MATLAB al diseño de costo óptimo de vigas de hormigón simplemente armadas y columnas doblemente reforzadas.” (9)

2.1.2.ANTECEDENTES NACIONALES

Henings en su texto de memoria y planos nos menciona lo siguiente respecto a la construcción de puente en forma de arco sobre el Río Carbón: el puente se ubica en la carretera Paucartambo – Salvador – Shintuya, red vial departamento ruta 100, distrito de Kosnipata, provincia de Paucartambo en la región del Cuzco;...está en la confluencia de la quebrada Gamitana y el Río Carbón. El río tiene un cauce definido y pendiente ligero;... se ha diseñado un arco atirantado tipo Network, con una luz de 120.00 mt, flecha de 16.20 mt, con arcos entre ejes y tirantes de concreto pos tensado monolíticos con una losa de concreto armado de peralte variable; aquí nos hace mención a estructuras de este tipo en nuestro medio. (10)

Se tiene un registro en el banco de proyectos del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) realizado por la Oficina de Proyectos de Inversión (OPI) de la Municipalidad Provincial de Huancavelica con el código registrado en el Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) N°: 256944 el proyecto: "INSTALACIÓN DEL PUENTE VEHICULAR ALBERTO BENAVIDES DE LA QUINTANA SOBRE EL RIO ICHU DEL BARRIO DE SAN CRISTÓBAL, DISTRITO DE HUANCAVELICA, PROVINCIA DE HUANCAVELICA – HUANCAVELICA" el cual tiene un presupuesto total de S/. 16'061,904.00 (dieciséis millones sesenta y un mil novecientos cuatro con 00/100 nuevos soles); proyecto planteado como alternativa de solución para una vía alterna de acceso a la ciudad de Huancavelica y que a la vez conforma el anillo vial a lo largo de esta localidad.

Referente a la optimización de estructuras Romani docente de la Universidad Nacional de Ingeniería profesor de Facultad de Ingeniería Civil afirma:

"Se ha desarrollado un procedimiento para la optimización de estructuras aporticadas de concreto armado, esto significa la búsqueda de valores adecuados para los distintos parámetros como son las dimensiones de las secciones de concreto, longitudes de elementos y cantidades de esfuerzo que hacen que el costo de una estructura sea mínima, para lo anterior se ha

hecho intervenir los costos de concreto, costos de refuerzo y de encofrado. El algoritmo de optimización empleado es el denominado Programación Cuadrática Secuencial (SQP), la cual pertenece a los métodos de optimización no lineal.” (11)

Cabe mencionar que en el ámbito nacional existe poca referencia en publicaciones de optimización mediante el uso de algoritmos matemáticos y heurísticos.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

2.2.1.1. DEFINICIÓN DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

Según X, Huang y M, Xie define de la siguiente manera:

“La optimización estructural busca lograr el mejor desempeño para una estructura mientras se va satisfaciendo varias restricciones tal como la búsqueda adecuada de la cantidad de material. El diseño estructural óptimo está convirtiéndose cada vez más en una importante necesidad para limitar los recursos de materiales, el impacto medioambiental y la competencia tecnológica, todos los cuales demandan obtener un peso ligero, un costo económico y alto rendimiento de las estructuras.” (12)

También Hojjat y Kaimal manifiesta:

“Para las estructuras de concreto armado el problema de optimización tiene que ser formulado como un problema de minimización de costo, porque los diferentes materiales son los que lo constituyen. En el contraste, para las estructuras de acero el problema de optimización puede formularse como un problema de minimización de peso.” (13)

Y Sánchez respecto a optimización nos dice lo siguiente:

“Trata de determinar las medidas óptimas de los elementos que constituyen una estructura de forma predefinida. Es el enfoque más

sencillo ya que el número de variables del problema es bastante ilimitado.” (14)

2.2.1.2. TIPOS DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

De acuerdo la metodología de resolución de los problemas podemos clasificar en dos: técnicas clásicas y aleatorias.

2.2.1.2.1. TÉCNICA DETERMINISTICO O CLÁSICO

También llamado como técnicas de optimización matemática podemos citar:

- Programación Lineal
- Programación Cuadrática
- Programación no lineal

2.2.1.2.2. TÉCNICA METAHEURISTICA O ALEATORIA

Sánchez caballero define:

“Las técnicas meta heurísticas, a diferencia de las técnicas de optimización tradicionales, no siguen unos métodos o reglas preestablecidas de búsqueda. A pesar de no seguir ningún tipo de procedimiento deductivo son capaces de proporcionar soluciones buenas en un periodo de tiempo razonablemente corto. El principal inconveniente de este tipo técnicas es que no garantizan la localización del óptimo absoluto, por lo que para tener la certeza de haberlo obtenido (o al menos un punto muy próximo) debe ejecutarse el algoritmo varias veces.” (14)

También denominado como técnicas aleatorias las cuales también podemos mencionar:

2.2.1.2.2.1. OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.

Se basan en el comportamiento social de animales como pueden ser enjambre de abejas, bandadas de pájaros y bancos de peces,

dicho comportamiento se relaciona con los grupos y fuerzas sociales que dependen de la memoria del individuo y la inteligencia de grupo.

2.2.1.2.2.2. OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS.

Esta técnica imita el comportamiento de las colonias de hormigas, abejas o avispas. Dichas colonias conformadas por individuos que realizan diversas tareas de exploración en busca de su comida, transporte de la comida, creación de sus nidos y defensa.

2.2.1.2.2.3. ALGORITMOS GENÉTICOS.

Esta técnica se basa en la búsqueda heurística inspirado en la genética y la selección natural de acuerdo al Naturalista Charles Darwin "El Origen de la Especies", de acuerdo a esta teoría los individuos más fuertes y aptos sobreviven ya que estos pueden adaptarse fácilmente a su entorno cambiante.

2.2.1.3. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA

En este capítulo describimos de una manera resumida los conceptos de Optimización Matemática para poder tener una adecuada comprensión de estas.

También se debe tener en cuenta que estos algoritmos se pueden utilizar para el análisis de fiabilidad estructural ya que también se formula como un problema de optimización matemática y cabe mencionar que existen algoritmos específicos para determinar la fiabilidad estructural.

"El toolbox del MATLAB pone en práctica el estado actual de la técnica en algoritmos de optimización. Los principales algoritmos para minimización no limitada son el método BFGS quasi-Newton y el método de Investigación directa Nelder-Mead con Investigación lineal. Para minimización con límites, logro de objetivos y optimizaciones

semiinfinitas se usan variaciones de programación cuadrática secuencial (SQP). Los problemas de mínimos cuadrados no lineales se resuelven usando los métodos de Gauss-Newton o de Levenberg-Marquardt. Las rutinas para resolver problemas de programación cuadrática y lineal usan un método de series activas combinando con técnicas de proyección. Las rutinas ofrecen una gama de algoritmos y estrategias de investigación lineal. Las estrategias de investigación lineal son métodos de interpolación y extrapolación cuadrática y cubica protegidos.” (15)

2.2.1.3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

“En un problema de optimización en ingeniería se trata de obtener un diseño óptimo, maximizando o minimizando una función que denominamos *función objetivo*. Esto se consigue asignando valores adecuados a los parámetros que definen el sistema. Estos parámetros se llaman *variables de diseño*. En la Mayoría de los Problemas de optimización encontramos *restricciones* que hay que imponer para que el diseño sea admisible o factible. Estas *restricciones* están determinadas por leyes físicas de la naturaleza, normatividad, etc.” (16)

La optimización matemática es una disciplina que estudia la minimización de una función objetivo en problemas con o sin restricciones. Matemáticamente, estos problemas se enuncian como:

$$\text{Minimizar:} \quad f(x) \quad x \in R^n \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeto a:} \quad & g_i(x) \leq 0 \quad i = 1..p \\ & h_i(x) = 0 \quad i = 1..q \text{ con } p + q = m \\ & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1 \dots n \quad (2) \end{aligned}$$

Dónde: x es el vector de variable de diseño en el espacio R^n sobre cuyos ejes coordenados se imponen unos límites inferiores y superiores (restricciones laterales), f es la función objetivo a minimizar, g_i son las restricciones de desigualdad y h_i representan las restricciones

de igualdad. Hay que notar que cada restricción de igualdad $h_i(x)=0$ se pueden convertir en dos restricciones de desigualdad, imponiendo simultáneamente que $h_i(x)\leq 0$ y $-h_i(x)\leq 0$. Se consideran que tanto la función objetivo como las restricciones son funciones continuas en R^n . En general, éstas son funciones no lineales e implícitas de las variables de diseño x que definen el problema.

2.2.1.3.2. CLASES DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

2.2.1.3.2.1. PROGRAMACIÓN LINEAL

Es aquella programación en la cual consta de una función objetivo lineal con restricciones lineales; uno de los métodos de solución más conocidos es el Método Simplex.

$$\text{Minimizar: } f(x) = e^t \cdot x \quad x \in R^n \quad (3)$$

$$\text{Sujeto a: } g(x) = A \cdot x + b \leq 0$$

$$h(x) = C \cdot x + d \leq 0 \quad (4)$$

2.2.1.3.2.2. PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA

Se encarga de resolver problemas con una función objetivo no lineal y restricciones lineales sean por igualdad o desigualdad.

$$\text{Minimizar: } \frac{1}{2} x^t H x + G^t x \quad (5)$$

$$\text{Sujeto a: } A \cdot x - b = 0$$

$$C \cdot x - d \leq 0 \quad (6)$$

2.2.1.3.2.3. PROGRAMACIÓN NO LINEAL

Resuelve problemas de función objetivo no lineal con restricciones no lineales de igualdad o desigualdad, es una de las formas más genérica y completa de resolución de problemas cuadráticos, el método más usado es la Programación Cuadrática Secuencial (SQP).

$$\text{Minimizar: } f(x) \quad x \in R^n \quad (7)$$

$$\text{Sujeto a: } h_i(x) = 0 \quad i = 1 \dots q$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1 \dots n \quad (8)$$

2.2.1.4. OPTIMIZACIÓN AMBIENTE MATLAB

2.2.1.4.1. PRINCIPALES TOOLBOX DEL MATLAB

Las virtudes según Pérez sobre el Toolbox del Matlab:

“Optimización Toolbox proporciona algoritmos para resolución de problemas de optimización, tales como programación lineal, programación cuadrática, mínimos cuadrados no lineales y resolución de ecuaciones no lineales. Contiene rutinas que ponen en práctica los métodos más ampliamente utilizados para realizar minimización y maximización.” ⁽¹⁵⁾

El toolbox incluye algoritmos para resolver muchos tipos de problemas de optimización, incluyendo algoritmos estándar para optimización al nivel actual de la técnica, minimización no lineal sin restricciones, minimización lineal restringida, incluyendo minimax, logro de objetivos y problemas de minimización semiinfinitos, programación cuadrática y lineal, mínimos cuadrados no lineales y ajuste de curvas con límites, sistema no lineal de resolución de ecuaciones y mínimos cuadrados lineales restringidos.

Todas las funciones que incluye el Toolbox son ficheros con extensión .m, construidos con declaraciones de Matlab e implementan algoritmos de optimización específicos. Cada una de las funciones resuelve un tipo optimización, pudiendo encontrar funciones para la resolución de los siguientes problemas:

- Minimización no lineal sin restricciones.
- Minimización no lineal con restricciones, incluyendo situaciones de mínimos-máximos, minimización semi-definida, alcanzar determinadas especificaciones.
- Programación lineal y cuadrática.
- Ajuste de curvas y problemas.
- Resolución de sistemas de ecuaciones no lineales.

- Mínimos cuadrados lineales con restricciones.
- Problemas de gran escala.

2.2.1.4.2. ALGORITMOS DE MINIMIZACIÓN

La mayoría de las opciones de trabajo en minimización sin y con restricción en el campo multivariable están presentes como funciones específicas en el MATLAB.

A continuación se muestra un cuadro resumido de todas las funciones de minimización que proporciona Optimization Toolbox.

FUNCION	DESCRIPCION
fgoalattain	Problemas multiobjetivo
fminbnd	Minimización no lineal escalar con fronteras
fmincon	Minimización no lineal con restricciones
fminimax	Problemas para obtener mínimos y máximos
fminsearch	Minimización no lineal sin restricciones
fminuc	
fseminf	Minimización de una función de varias variables semi infinita
linprog	Problemas de programación lineal
quadprog	Problemas de programación cuadrática

Tabla 1. Tipos de algoritmos del MATLAB.

2.2.1.4.2.1. FUNCIÓN fmincon

Una de las funciones de optimización que mejor se adapta a la características de resolver con el programa MATLAB es la función de minimización del Toolbox de Optimización **fmincon**. El propósito de esta función es encontrar el mínimo del valor escalar que devuelve una función de varias variables no lineal y sujeta a una serie de restricciones. Normalmente se conoce este tipo de problemas como optimización no lineal con restricciones o programación no lineal. La función escalar de varias variables se

llamará función objetivo. El usuario debe implementar esta función objetivo para que se realicen los cálculos oportunos para obtener el valor escalar que devuelve la función.

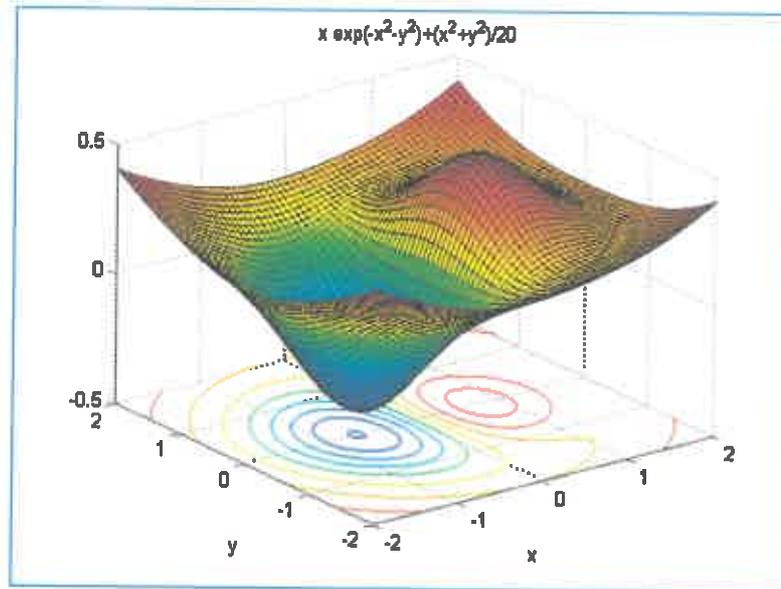


Figura 1. Ejemplo de función de 03 dimensiones para minimización

2.2.1.4.2.2. DEFINICIÓN DE MINIMIZACIÓN RESTRINGIDA

MathWorks Inc. lo define como:

“La minimización restringida es el problema para encontrar un vector x que es un mínimo local de una función escalar $f(x)$ sujeta a las restricciones permisibles en x :

$$\min_x f(x)$$

Tal que está sujeta a una o más de las siguientes: $c(x) \leq 0$, $ceq(x) = 0$, $Ax \leq b$, $Aeqx = beq$, $l \leq x \leq u$. Estas son las restricciones más usadas en programación semilinfinita.” (17)

Podemos mencionar los siguientes algoritmos de implementación de la función *fmincon* del MATLAB:

- Interior Point

- SQP
- Active Set
- Trus Region Reflective

2.2.1.4.3. DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN SQP

El método SPQ representa el estado de arte en los métodos de programación no lineal, por ejemplo ha sido implementado y probado las salidas con otros métodos una versión por lo que se refiere en la eficacia, exactitud, y porcentaje de soluciones exitosas, por encima de un número grande de problemas de prueba.

Según Matworks manifiesta que es **"Basado en los trabajos de Biggs, Han y Powell (2006), el método permite imitar estrechamente al método de Newton para optimización restringida justo como se hace para optimización no restringida. En cada iteración sucesiva, se hace una aproximación de la matriz Hessiana de la función Lagrangiana usando un método de actualización quasi-Newton. Este es usado para generar un subproblema QP cuya solución es usada para formar una dirección de búsqueda por un procedimiento de búsqueda lineal."**

(17)

Una descripción para un problema general es declarado como:

$$\min_x f(x) \quad (9)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} G_i(x) &= 0, & i &= 1, \dots, m_e \\ G_i(x) &\leq 0, & i &= m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

Donde x es el vector de parámetros de diseño de tamaño n , $f(x)$ es la función objetivo cuyo resultado es un valor escalar y el vector $G(x)$ retorna un vector de longitud m que contiene los valores de las restricciones de igualdad y desigualdad evaluadas en x .

En la optimización restringida, el objetivo general es transformar el problema general en un sub problema más fácil que se pueda resolver y luego se pueda usar como la base de un proceso iterativo. Una amplia característica de los métodos de simplificación es la transformación del problema restringido a un problema restringido básico usando una función de penalización por restricciones que estén cercanos o más allá de las restricciones de borde. De esta manera el problema restringido se resuelve usando una secuencia parametrizada de optimizaciones restringidas, que están dentro del límite (de la sucesión) convergiendo el problema restringido. Estos métodos son ahora considerados relativamente ineficaces y se ha reemplazado por los métodos que están enfocados en la solución de ecuaciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT).

2.2.1.4.4. ECUACIONES DE KARUSH – KUHN - TUCKER

Las ecuaciones de Karush-Kuhn-Tucker según Mathworks:

“Las ecuaciones de KKT son las condiciones necesarias para optimización de un problema de optimización restringida. Este problema es llamado también como programación convexa, esto es:

$f(x)$

$G_i(x)$, $i = 1, \dots, m$, son funciones convexas

Entonces las ecuaciones de KKT son necesarias y suficientes para un punto de solución global.” (17)

Referente a la ecuación 9 y 10 las ecuaciones de KKT pueden ser declarados como:

$$\begin{aligned} \nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla G_i(x^*) &= 0 \\ \lambda_i \cdot G_i(x^*) &= 0, \quad i = 1, \dots, m_e \\ \lambda_i &\geq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

En adición a las restricciones originales de la ecuación 9 y 10.

La primera ecuación describe una cancelación de las gradientes entre las funciones objetivo y la restricción activa en el punto solución. Para las gradientes a ser cancelados los Multiplicadores de Lagrange ($\lambda_i, i = 1, \dots, m$) son necesarios para balancear la magnitud de desviaciones de las gradientes de la función objetivo y las restricciones. Porque solamente las restricciones activas son incluidas en esta operación de cancelación, las restricciones que no son activas no son incluidas en esta operación y también están dados los multiplicadores de Lagrange igual a 0. Esto se declara implícitamente en las últimas dos ecuaciones de Kuhn-Tucker.

La solución de las ecuaciones de KKT es la base de muchos algoritmos de programación no lineal. Estos algoritmos son el esfuerzo computacional para obtener directamente los multiplicadores de Lagrange. Los métodos de restricción quasi-Newton garantizan la convergencia súper lineal por acumulación de información segundo orden con respecto a las ecuaciones de KKT usando un procedimiento de actualización quasi-Newton. Estos métodos normalmente son llamados como Programación Cuadrática Secuencial (SQP), a partir de que un sub problema de Programación Cuadrática (QP) se resuelve en cada iteración.

2.2.1.4.4.1. ECUACIÓN

El problema general de este tipo es como sigue:

$$\min_x f(x)$$

Sujeto a las restricciones:

$$c(x) \leq 0$$

$$ceq(x) = 0$$

$$A \cdot x \leq b$$

$$Aeq \cdot x = beq$$

$$lb \leq x \leq ub$$

(12)

Donde: x , b , beq , lb y ub son vectores, A y Aeq son matrices y $c(x)$, $ceq(x)$ y $F(x)$ son funciones que devuelven vectores. $F(x)$, $c(x)$ y $ceq(x)$ pueden ser funciones no lineales.

2.2.1.4.4.2. SÍNTAXIS

El problema arriba mencionado lo resuelve la función *fmincon*, cuya sintaxis es la siguiente:

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b)$

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq)$

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, lu)$

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, lu, nonlcon)$

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, lu, nonlcon, options)$

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, lu, nonlcon, options, P1, P2, \dots)$

$[x, fval] = \text{fmincon}(\dots)$

$[x, fval, exitflag] = \text{fmincon}(\dots)$

$[x, fval, exitflag, output] = \text{fmincon}(\dots)$

$[x, fval, exitflag, output, lambda] = \text{fmincon}(\dots)$

$[x, fval, exitflag, output, lambda, grad] = \text{fmincon}(\dots)$

$[x, fval, exitflag, output, lambda, grad, hessian] = \text{fmincon}(\dots)$

2.2.1.4.4.3. DESCRIPCIÓN Y PARADIGMA

$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, lu, nonlcon, options, P1, P2, \dots)$

pasa parámetros adicionales a la función objetivo, sin necesidad de tener variables globales. Cuando los argumentos de la función A , b , Aeq , beq , lb , lu , $nonlcon$ y $options$, no sean necesarios, habrá que establecerlos como matrices vacías.

$[x, fval, exitflag, output, lambda, grad, hessian] = \text{fmincon}(\dots)$, devuelve los mismos valores anteriores y además el valor del Hessian de la función fun en la solución obtendrá x .

Como ejemplo minimizamos la función $f(x)=-x_1*x_2*x_3$ sujeta la restricción $0\leq x_1+2*x_2+2*x_3\leq 72$ comenzando en el punto $x_0=[10;10;10]$

Reescribiendo la restricción como:

$$-x_1-2*x_2-2*x_3\leq 0$$

$$x_1+2*x_2+2*x_3\leq 72$$

Podemos utilizar las matrices

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -2 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 72 \end{bmatrix}$$

Para plantear la restricción de la forma $A*x\leq b$

Definimos la función objetivo mediante el M-fichero myfun.m

```
function f = myfun(x)
```

```
f = -x(1) * x(2) * x(3);
```

Ahora ya se puede resolver el problema mediante la sintaxis:

```
>> A=[-1 -2 -2; 1 2 2];
```

```
>> b=[0 72];
```

```
>> x0=[10;10;10];
```

```
>> [x,fval]=fmincon(@myfun,x0,A,b)
```

Optimization terminated successfully:

Magnitude of directional derivative in search direction

less than 2*options.TolFun and maximum constraint violation

is less than options.TolCon

Active Constraints:

2

x =

24.0000

12.0000

12.0000

fval =

-3456

2.2.2.DISEÑO DE COSTO ÓPTIMO

2.2.2.1. DEFINICIONES DE DISEÑO DE COSTO ÓPTIMO

Con respecto al diseño de costo óptimo Mestas menciona:

“Se puede definir al problema de diseño óptimo como: aquel que se plantea determinar el valor de una serie de variables de manera que se minimice o maximice el valor de una función objetivo, a la vez que se cumplen una serie de restricciones impuestas.” (18)

2.2.2.1.1. DISEÑO ECONÓMICO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN

Para elementos sometidos a esfuerzos de compresión McCormac dice:

“Los concretos de alta resistencia se pueden usar más económicamente en las columnas que en las vigas. Bajo cargas ordinarias, de solo 30 a 40% de la sección transversal de una viga esta en compresión, mientras que el restante 60 a 70% están en tensión y supuestamente agrietado. Esto significa que si se usa un concreto de alta resistencia para una viga, 60 a 70% se desperdicia. Sin embargo, para una columna usual, la situación es realmente diferente porque un porcentaje mucho mayor de su sección transversal esta en compresión. Como consecuencia es muy económico usar concretos de alta resistencia en columnas.” (19)

Una de las ventajas ya consideradas para el diseño económico de un puente es usar una estructura en arco, ya que esta estructura se comporta en forma similar a una columna puesto que todos los esfuerzos son transmitidos a la viga arco en compresión pura, el cual justifica lo mencionado en líneas arriba.

2.2.2.2. PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN

2.2.2.2.1. DISEÑO TRADICIONAL

El diseño de la forma o método tradicional es fundamentalmente regido por la pericia y experiencia del diseñador, tomándose en cuenta los criterios de la normatividad vigente y es como sigue:



Figura 2. Proceso de diseño prueba y error

2.2.2.2.2. DISEÑO CON OPTIMIZACIÓN

El objeto de diseño con optimización es usado mediante alguna herramienta o técnica de optimización el cual ésta ayuda en el proceso mediante sucesivas iteraciones en función a ciertas restricciones de las variables de diseño el cual arrojan una función objetivo adecuada, ésta se retomó como se muestra en la siguiente (figura 3):



Figura 3. Proceso de Diseño Optimizado

2.2.2.3. NORMAS PARA DISEÑO EN CONCRETO ARMADO Y Puentes

2.2.2.3.1. NORMA ACI 318-11 PARA DISEÑO

Gran parte de la metodología de diseño en estructuras para concreto armado están regidos de acuerdo a la norma ACI 318S-11, establecidos para elementos sometidos a esfuerzos de flexo compresión, una combinación de elementos sometidos a flexión y a compresión, también este reglamento sirve como fundamento principal para la norma LRFD-14 para el diseño de puentes de concreto armado y acero estructural.

Las disposiciones del Capítulo 10 – Flexión y Cargas Axiales del reglamento del ACI 318S-11 se deben aplica al diseño de elementos sometidos a flexión o cargas axiales, o a la combinación de flexión y cargas axiales.

2.2.2.3.1.1. SUPOSICIONES DE DISEÑO

Para el caso de las fórmulas y ecuaciones generales el (ACI 318S-11) nos rige:

“El diseño por resistencia de elementos sometidos a flexión y cargas axiales debe basarse en las hipótesis

dadas en 10.2.2 a 10.2.7 y debe satisfacer las condiciones de equilibrio y de compatibilidad de deformaciones.” (20)

2.2.2.3.1.2. EFECTOS DE ESBELTEZ EN ELEMENTOS A COMPRESIÓN

Se permite ignorar los efectos de esbeltez en los siguientes casos:

- a. Elementos sometidos a compresión no arriostrados contra desplazamientos laterales cuando:

$$\frac{K L u}{r} \leq 22 \quad (13)$$

- b. En elementos a compresión arriostrados contra desplazamientos laterales cuando:

$$\frac{K L u}{r} \leq 34 - 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \leq 40 \quad (14)$$

Donde el término M_1/M_2 es positivo si la columna esta flectada en curvatura simple y negativo si el elemento tiene curvatura doble.

2.2.2.3.2. NORMA LRFD-2012 PARA PUENTES EN ARCO

El método LRDFD (Diseño por Factores de Carga y Resistencia), filosofía de diseño de reciente desarrollo y ha ganado mucho terreno en otras áreas de la ingeniería estructural y en otras partes del mundo como Estados Unidos, Canadá y Europa.

“El método de diseño LRFD toma en cuenta la variabilidad en las propiedades de los elementos estructurales de una manera explícita. El LRFD se apoya en el uso extensivo de métodos estadísticos que determinan acertadamente los factores de carga y resistencia adecuados para cada tipo de elemento estructural. El método LRFD se fue desarrollado

en un formato de diseño por estados límites basados en una confiabilidad estructural $\beta=3.5$ equivalente a una probabilidad de ocurrencia de efectos mayores a la resistencia de 2/10000.” (21)

“Una extensión filosófica adicional resulta de considerar la variabilidad en las propiedades de los elementos estructurales de manera similar a la variabilidad de las cargas. Aunque consideradas de una manera limitada en el DFC, la filosofía de diseño del LFRD toma en cuenta de una manera explícita la variabilidad en el comportamiento estructural de los elementos. La metodología LFRD se basa en el uso extensivo de métodos estadísticos, pero pone los resultados de una manera que es fácilmente utilizable por diseñadores y analistas de puentes.” (22)

2.2.2.3.2.1. SOBRECARGA DE DISEÑO

a. CAMIÓN DE DISEÑO

Para la metodología LFRD la carga vehicular de acuerdo al Reglamento Americano (Especificaciones Estándar AASHTO) se toma en cuenta el ancho de vía igual 3.60 m y la carga vehicula es también denominada el HL-93K truk:

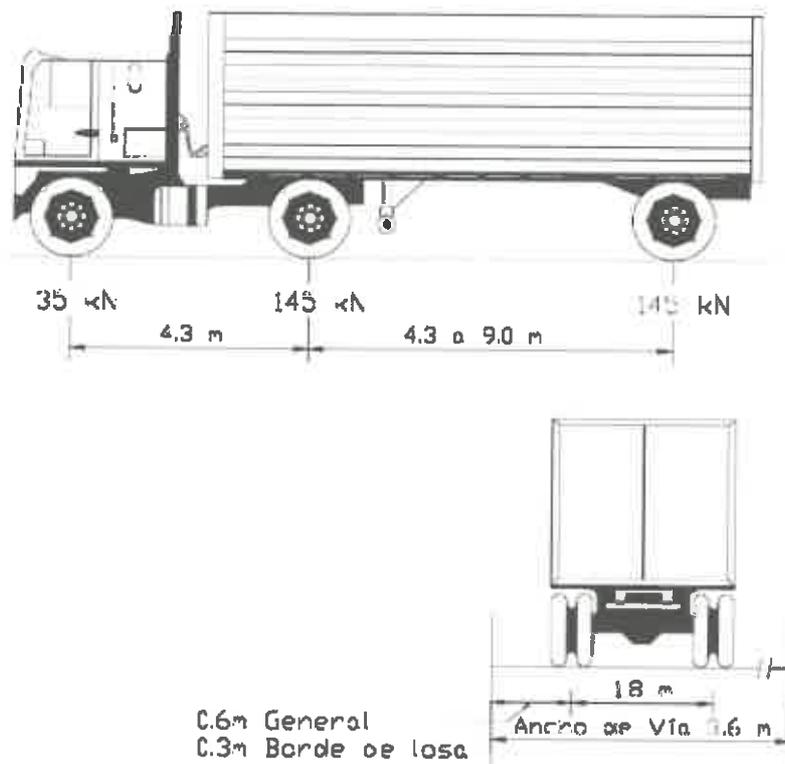


Figura 4. Características del camión de diseño.

b. TÁNDEM DE DISEÑO

El tándem de diseño consistirá en un conjunto de dos ejes, cada uno con una carga de 110 kN (11.20 tn), espaciados a 1.20 m. La distancia entre las ruedas de cada eje, en dirección transversal, será de 1.80 m. la nomenclatura que se utiliza es HL-93M.

c. CAMIÓN HL-93S

Este es el camión también denominado HL-93 especial, es el mismo tipo del camión estándar pero la diferencia es que este tipo se plantea para puentes de tramos continuos, estos son vehículos contiguos que están separados a una distancia de 15.00 metros del eje posterior de uno y delantero del otro, uno detrás del otro.

d. SOBRECARGA DISTRIBUIDA

Se considera una sobrecarga de 9.30 kN/m (970 kgf/m), uniformemente distribuida en dirección longitudinal sobre aquellas porciones del puente en las que produzca un efecto desfavorable. Se supondrá que esta sobrecarga se distribuye uniformemente en un ancho de 3.00 m en dirección transversal. Esta carga se aplicará también sobre aquellas zonas donde se ubique el camión o el tándem de diseño. No se considerarán efectos dinámicos para esta carga.

2.2.2.3.2.2. TEORÍA DE LAS GRANDES DEFORMACIONES

Un análisis de grandes deformaciones correctamente formulado es aquél que permite obtener todas las solicitaciones necesarias para el diseño. No requiere la aplicación posterior de factores de amplificación de momentos. La presencia de fuerzas de compresión axial amplifica tanto la falta de linealidad geométrica de un componente como la deformación provocada por las cargas no tangenciales que actúan sobre el mismo, consecuentemente aumentando la excentricidad de la fuerza axial con respecto al eje del componente. El efecto sinérgico de esta interacción es el aparente ablandamiento del componente, es decir, una pérdida de rigidez. Esto habitualmente recibe el nombre de efecto de segundo orden. Lo inverso es válido para la tracción. A medida que la tensión de compresión axial se vuelve un porcentaje mayor de la tensión de pandeo de Euler, este efecto se vuelve cada vez más significativo. ⁽²³⁾

2.2.2.3.2.3. MAGNIFICACIÓN DE MOMENTOS EN ARCOS

Una parte de la metodología de los métodos aproximados para la Amplificación de Momentos Vigas-Columna se menciona en el reglamento LRFD-2012. Art. 4.5.3.2.2a.

Existen factores para la magnificación de momentos – arcos en el reglamento del LRFD-2012 el cual se detallan específicamente como también el factor K para longitud efectiva de nervaduras de arco, estas están en función de la relación flecha del arco y la longitud o luz libre.

2.2.2.3.3. PLANTEAMIENTO Y GEOMETRÍA DE UNA VIGA ARCO PARA PUENTE

2.2.2.3.3.1. GENERALIDADES

La integración con la vía de comunicación y el medio ambiente es el objetivo principal del proyecto geométrico del puente.

Se considera dos aspectos dentro de la geometría del proyecto de un puente:

a. Geometría general del proyecto

Trata de la integración del proyecto del puente con un proyecto geométrico de una autopista y con las condiciones locales, topográficas, geotécnicas, hidrológicas y ambientales.

b. Geometría de detalles

Se refiere a la presentación de dimensiones determinadas de las secciones transversales, gálibos y dispositivos estándares. ⁽²²⁾

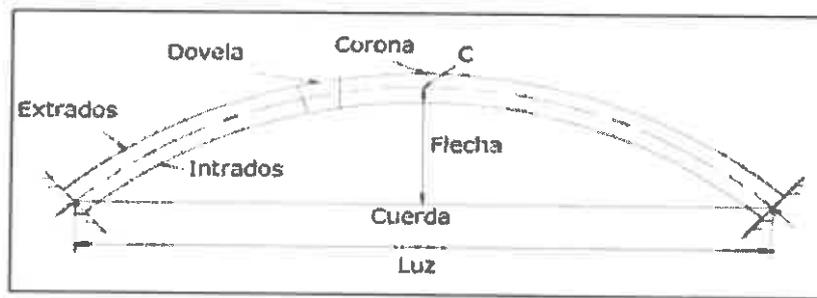


Figura 5. Elementos principales de una viga arco.

2.2.2.3.3.2. UBICACIÓN

La ubicación de un puente está dada en función a las necesidades de la ruta que está en uso o si se trata de una nueva vía estará en función de las muchas rutas en consideración en el estudio. La ubicación del puente elegido será aquel que mejor favorece el cruce del obstáculo.

La ubicación de la sección adecuada para el diseño estará en consideración del costo del capital inicial de los trabajos y de la minimización del costo total, incluyendo los trabajos necesarios para reducir la erosión.

2.2.2.3.3.3. ELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE PUENTE

El manual de Análisis, Diseño y Construcción de Puentes para el Perú nos menciona:

“Los puentes en arco son competitivos, económicamente, a partir de los 50 m en arcos de concreto y mayor para arcos en acero, por el mayor costo de su procedimiento constructivo y el arco en sí, que ya representa un elemento más por construir, aparte del tablero de tránsito, por lo que en los límites de estas luces, debe hacerse una comparación

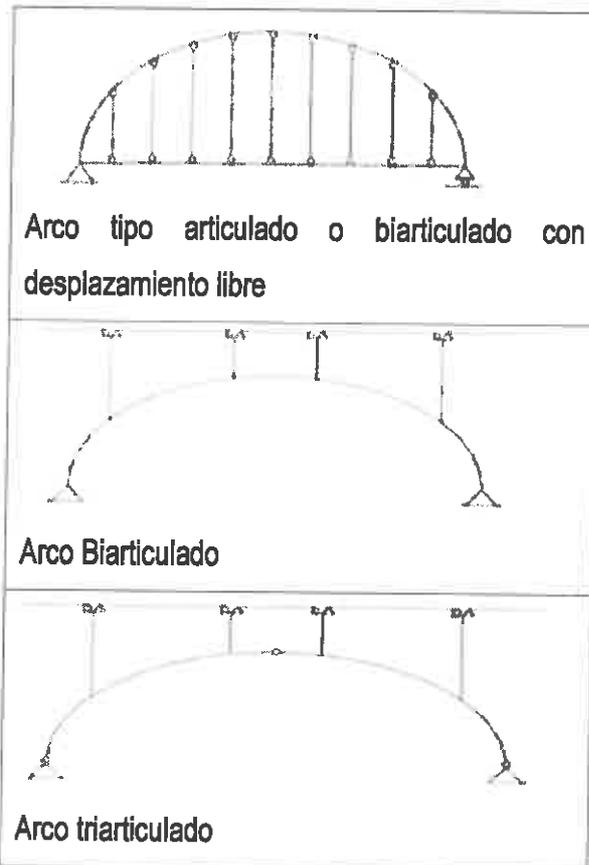
económica, con las soluciones en viga o aporticadas.”

(24)

Para la elección del puente por el tipo de material que lo conforma se tomó en cuenta utilizar el concreto armado, este criterio es reforzado por Leet Kenneth y Chia- Ming y nos manifiesta que:

“Los arcos doblemente empotrados se construyen casi siempre de mampostería o de concreto cuando la base del arco se apoya siempre en roca, en bloques masivos de mampostería o en cimentaciones pesadas de concreto reforzado.” (25)

La clasificación de puentes en arco de acuerdo a las articulaciones podemos mencionar:



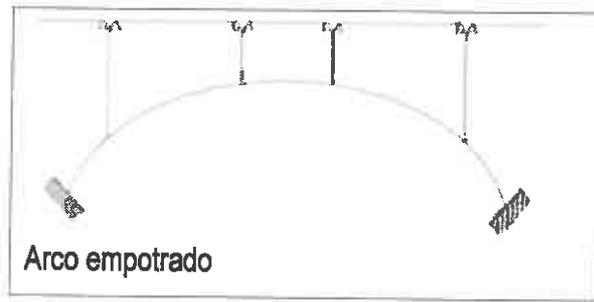


Figura 5. Clasificación de acuerdo a sus articulaciones.

La clasificación de puentes en arco de acuerdo a la disposición del tablero tenemos:

<p>Puente arco de tablero superior</p>	
<p>Puente arco de tablero inferior</p>	
<p>Puente arco de tablero medio</p>	

Figura 7. Clasificación según la disposición del tablero.

Por el tipo de puente en arco de concreto armado, por la ubicación y por la topografía se seleccionó uno del tipo empotrado con tablero superior.

2.2.2.3.3.4. FUNICULAR DEL ARCO Y CLASIFICACIÓN DE MIEMBROS CURVOS

a. FUNICULAR DEL ARCO

Es la forma curva que adopta el un cable o arco al ser sometido a una carga vertical distribuida uniformemente.

Una cuestión importante para tomar en cuenta para la funicular del arco:

“Como la curva funicular se halla, gráficamente, para una estructura estáticamente determinada, se determinaría para el arco de tres articulaciones y para las otras configuraciones se tendría un valor aproximado, ya que tendría que considerarse, adicionalmente, los esfuerzos producidos por las deformaciones de la estructura. Igualmente, también tiene que tenerse en cuenta, que la funicular corresponde a un determinado estado de cargas, por lo que para un puente en arco, sometido a condiciones variables de carga viva de tránsito, se tiene que fijar el estado de cargas más representativo o crítico para encontrar una funicular, tal que los otros casos de carga, produzcan curvas funiculares de cargas que se desvíen lo menos posible de la directriz seleccionada.” (24)

Las coordenadas de los ejes del arco parabólico son:

$$y = 4f \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{x}{L} \quad (15)$$

El ángulo de inclinación del eje del arco para puntos que no sean los tabulados puede hallarse mediante la ecuación:

$$\tan\phi = \frac{4f}{L} \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \quad (16)$$

b. CLASIFICACIÓN DE MIEMBROS CURVOS

“Arcos Primarios” se adapta mejor para la construcción de cortinas para presas, estructuras de arco, hangares y otras construcciones similares.

“Arcos cuadráticos” se considera como más económico en la construcción de puentes. ⁽²⁶⁾

Un arco primario puede ser definido como un arco cuyas mitades son simples prismoides de ancho constante, deformados a la curva del arco. Sus secciones varían más o menos uniforme desde la corona hasta el estribo, variando el momento de inercia de la sección de acuerdo con la ecuación lineal:

$$I = \frac{I_o}{\cos\varphi \left[1 - (1 - k) \frac{2y}{L} \right]} \quad (17)$$

Donde:

I = Momento de inercia de una sección arbitraria de arco con relación a su eje neutro.

I_o = Momento de inercia de la sección de la corona del arco, en torno de su eje neutro.

k = constante del arco, definida por la ecuación:

$$k = \frac{I_o}{I_a \cos\varphi_a} \quad (18)$$

I_a = Momento de inercia de la sección de arco en torno a su eje neutro de la línea de arranque.

φ_a = Angulo que forma el eje del arco con la horizontal en la línea de arranque.

φ = Angulo formado entre el eje del arco y la horizontal en la sección definida por la abscisa y .

L = Luz del arco.

Un arco cuadrático se puede definir como el arco cuya sección transversal es substancialmente constante en

la parte central de la luz, pero varía rápidamente en la proximidad del estribo.

2.2.2.3.4. PREDIMENSIONAMIENTO DE UNA VIGA ARCO PARA PUENTE

El Instituto de la Gerencia y Construcción (ICG) nos da una recomendación para el predimensionamiento:

“Dos de las secciones más importantes y críticas del arco, resultan ser los arranques y la clave, por lo que, normalmente, puede empezarse con determinar los parámetros de la sección recta en estos puntos y para esto es muy útil, tener como referencia datos de Puentes construidos.” (24)

Para proporcionar una solución inicial, se puede hacer un predimensionado rápido para la clave del arco usando la relación empírica propuesta por Elías Riveros: (27)

$$hc = \left[\frac{110.53}{f_{tc}} \cdot \left(4.597\sqrt{L} + 0.833 \cdot L + \frac{WD}{0.942} + \frac{WL}{0.384} \right) \right] + 5 \quad (19)$$

Donde:

hc= clave del arco

f_c = resistencia a la compresión del concreto

L = luz total del arco

WD = carga muerta distribuida

WL = carga viva distribuida

Una vez determinado la clave del arco se puede estimar el arranque del arco con:

$$e_a = 2.34 \cdot e_c \quad (20)$$

Como también la base de la viga se estima con:

$$b = \sqrt{S'} \cdot L \cdot 0.0106 \quad (21)$$

Donde:

S'=separación del eje entre vigas

L=luz del arco

2.2.2.4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO SQP PARA PUENTES EN ARCO DE CONCRETO ARMADO

2.2.2.4.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN EN VIGAS ARCO

Para el diseño de una viga en arco es necesario transmitir todas las cargas de nuestro puente (esfuerzos de compresión, momentos flectores, cortantes, etc.), La sección transversal de la viga puede ser cuadrada, rectangular, circular, tubular u otra forma en este caso hemos desarrollado una sección rectangular.

En este estudio hemos considerado la norma del ACI 318S-11 el cual rige y está considerado para poder formular el modelo matemático.

También hemos tomado en cuenta la esbeltez de la estructura de acuerdo al LRFD-2012 y como también la magnificación de momentos para vigas en arco.

2.2.2.4.1.1. EL ESTADO LÍMITE DE DISEÑO:

El método LRFD especifica que los puentes deben ser diseñadas para Estados Límites específicos para alcanzar los objetivos de constructibilidad, seguridad, y funcionalidad, tomando en cuenta también aspectos que tienen que ver con la facilidad de inspección, económica y estética. ⁽²¹⁾

Requisitos generales son:

$$n_i \sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (22)$$

Donde:

n_i = modificador de carga.

Q_i = carga especificada de diseño

γ_i = factores de carga especificadas (tabla 2 y 3)

ϕ = factor de resistencia

R_n = Resistencia nominal

R_t = Resistencia mayorada

Combinación de cargas	DC DD DW EH EV ES EL	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	Usar sólo por una vez				
										EQ	IC	CT	CV	
Estado Límite														
RESISTENCIA I (a menos que se especifique lo contrario)	γ_P	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	TG	SE	-	-	-	-	-
RESISTENCIA II	γ_P	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	TG	SE	-	-	-	-	-
RESISTENCIA III	γ_P	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	TG	SE	-	-	-	-	-
RESISTENCIA IV – Sólo EH, EV, ES, DW, DC	$\gamma_P/1.50$	-	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	TG	SE	-	-	-	-	-
EVENTO EXTREMO I	γ_P	EQ	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	-
EVENTO EXTREMO II	γ_P	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00	-
SERVICIO I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00/120	TG	SE	-	-	-	-	-
SERVICIO II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/120	-	-	-	-	-	-	-
SERVICIO III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/120	TG	SE	-	-	-	-	-
SERVICIO IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00	1.00/120	-	1.00	-	-	-	-	-
FATIGA – sólo LL, IM y CE	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2. Combinaciones de Carga y Factores de Carga

Tipo de carga	Factor de Carga	
	Máximo	Mínimo
DC: Elemento y accesorios	1.25	0.90
DD: Fricción negativa (downdrag)	1.80	0.45
DW: Superficie de rodamiento e instalaciones para servicios públicos	1.50	0.65
EH: Empuje horizontal del suelo		
	• Activo	1.50
• Pasivo	1.35	0.90

El: Tensiones residuales de montaje	1.00	1.00
EV: Empuje vertical del suelo		
• Estabilidad global	1.00	1.00
• Muros de sostenimiento y estribos	1.35	0.90
• Estructura rígida enterrada	1.30	0.90
• Marcos rígidos	1.35	0.90
• Estructuras flexibles enterradas u otras, excepto alcantarillas metálicas rectangulares	1.95	0.90
• Alcantarillas metálicas rectangulares flexibles	1.50	0.90
ES: Sobrecarga de suelo	1.50	0.75

Tabla 3. Factores de Carga para Cargas Permanentes

2.2.2.4.1.2. LOS MODIFICADORES DE CARGA SON:

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

$$n_i = n_D n_R n_I \geq 0.95 \quad (23)$$

Donde:

n_D = factor relacionado a la ductilidad

n_R = factor relacionado con la redundancia

n_I = factor relacionado con la importancia operativa

DUCTILIDAD:

Para conexiones no dúctiles = 1.05

Para diseños convencionales = 1.00

Para elementos y conexiones con medidas adicionales
= 0.95

REDUNDANCIA:

Para elementos no redundantes = 1.05

Para niveles convencionales de redundancia = 1.00

Para niveles excepcionales de redundancia = 0.95

IMPORTANCIA OPERATIVA:

Para puentes importantes = 1.05

Para puentes típicos = 1.00

Para puentes relativamente poca importancia = 0.95

2.2.2.4.1.3. CARGA PARA RESISTENCIA ÚLTIMA:

Como forma general para los esfuerzos últimos:

$$U = n_i[\gamma_{PDC} \cdot Q_{PDC} + \gamma_{PDW} \cdot Q_{PDW} + \gamma_{LL+IM} \cdot Q_{LL+IM}] \quad (24)$$

Estas variables son los momentos y fuerzas internas correspondientes a las cargas correspondientes, para un diseño de RESISTENCIA I: Combinación básica de carga relacionada con el uso vehicular normal sin considerar el viento. Art. 1.3.2.1 del LRFD

Para el caso del Incremento por Carga Dinámica se tomó en cuenta el factor por impacto de la carga vehicular que es de un 33%. Art. 3.6.2.1 del LRFD

Componentes	IM
Juntas del tablero – Todos los Estados Límites	75%
Todos los demás componentes	
• Estado Límite de fatiga y fractura	15%
• Todos los demás Estados Límites	33%

Tabla 4. Incremento por Carga Dinámica IM

2.2.2.4.1.4. LA AMPLIFICACIÓN DE MOMENTOS:

Método aproximado para amplificación de momentos: ⁽²³⁾

Art. 4.5.3.2.2b del LRFD.

$$M_c = \delta_b \cdot M_{2b} + \delta_s \cdot M_{2s} \quad (25)$$

$$f_c = \delta_b \cdot f_{2b} + \delta_s \cdot f_{2s} \quad (26)$$

Donde:

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi \cdot P_e}} \geq 1.00 \quad (27)$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma P_u}{\phi \cdot \Sigma P_e}} \quad (28)$$

Y donde:

P_u = carga axial mayorada

P_e = carga de pandeo de Euler

ϕ = factor de resistencia

M_{2b} = momento mayor que no provoca desplazamiento lateral

f_{2b} = tensión correspondiente a M_{2b}

M_{2s} = momento debido a las fuerzas laterales

f_{2s} = tensión correspondiente a M_{2s}

$C_m = 1.0$ del Art. 4.5.3.2.2c del LRFD-2012

Para la Carga de Pandeo de Euler: ⁽²³⁾ Art. 4.5.3.2.2b-5

$$P_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot Lu)^2} \quad (29)$$

Donde:

E = Módulo de Elasticidad

I = Momento de Inercia de la respecto al eje considerado

K = Factor de longitud efectiva

L_u = Semilongitud no arriostrada del elemento comprimido

Relación Flecha/Longitud	Arco Triarticulado	Arco Biarticulado	Arco Fijo
0.1 – 0.2	1.16	1.04	0.70
0.2 – 0.3	1.13	1.10	0.70
0.3 – 0.4	1.16	1.16	0.72

Tabla 5. Valores de K para longitud efectiva de nervaduras de arco

2.2.2.4.2. FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo para la búsqueda de función mínima de la viga en arco de concreto armado por metro lineal se expresa con 03 variables de diseño: la base b , la altura total h , el área de acero en tracción A_s y que es igual al de compresión A_s' para este caso.

$$\min F = C_c b h + C_s (A_s + A_s') + C_f (b + 2h) \quad (30)$$

Donde:

C_c =costo del concreto en \$/cm²/m

C_s =costo del acero en \$/cm²/m

C_f =costo del encofrado en \$/cm/m

b, h , en cm, A_s y A_s' en cm²

Si simplificamos el cálculo y haciendo $A_s=A_s'$ que además por facilidades para el proceso constructivo recomiendan el armado simétrico. ⁽²⁸⁾

Finalmente la función objetivo final es:

$$\min F = C_c b h + 2C_s A_s + C_f (b + 2h) \quad (31)$$

2.2.2.4.3. CODIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO

Se tomó en cuenta las variables de diseño como son la base b , la altura total h y el área de acero como ya se mencionó:

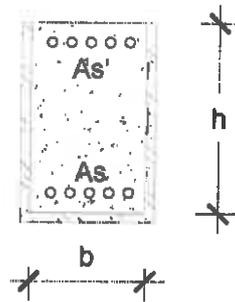


Figura 8. Sección típica de la viga tipo arco

Donde: $b = x(1)$
 $h = x(2)$
 $As = As' = x(3)$

2.2.2.4.4. ECUACIONES DE RESTRICCIÓN Y BORDE

2.2.2.4.4.1. RESTRICCIONES POR ESFUERZO A COMPRESIÓN

La carga axial última P_u no debe tomarse mayor que la resistencia axial de diseño máxima ϕP_{nmax} . Para elementos no preesforzados con estribos dispuesta en el ACI 318-11 Art. 10.3.6.2: ⁽²⁰⁾

$$\phi P_{nmax} = 0.8\phi [0.85f'c(Ag - As_1) + As_1fy] \geq P_u$$

$$P_u - 0.8\phi [0.85f'c(Ag - As_1) + As_1fy] \leq 0 \quad (32)$$

Haciendo $Ag=bh$ que es el área total de la sección en cm^2 ; $Ast=As+As'$ es el área total del refuerzo longitudinal en cm^2 , $f'c$ es la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días en kg/cm^2 y fy es la fluencia del acero en kg/cm^2 . Como ya mencionamos por facilidad en el proceso constructivo tomamos $As=As'$: ⁽²⁸⁾

$$g_1 = 1.36\phi f'cAs - 1.60\phi fyAs - 0.68\phi f'cbh + P_u \leq 0 \quad (33)$$

2.2.2.4.4.2. RESTRICCIÓN POR FLEXIÓN UNIAxIAL

En el diseño de la viga arco tenemos un momento flector M , además de saber que P es la carga axial actuante en el centroide plástico de la sección entonces existe una excentricidad "e" es: $e = M/P$. Se tiene un posible estado de esfuerzos del hormigón y fuerzas del acero en el estado de falla en la siguiente figura.

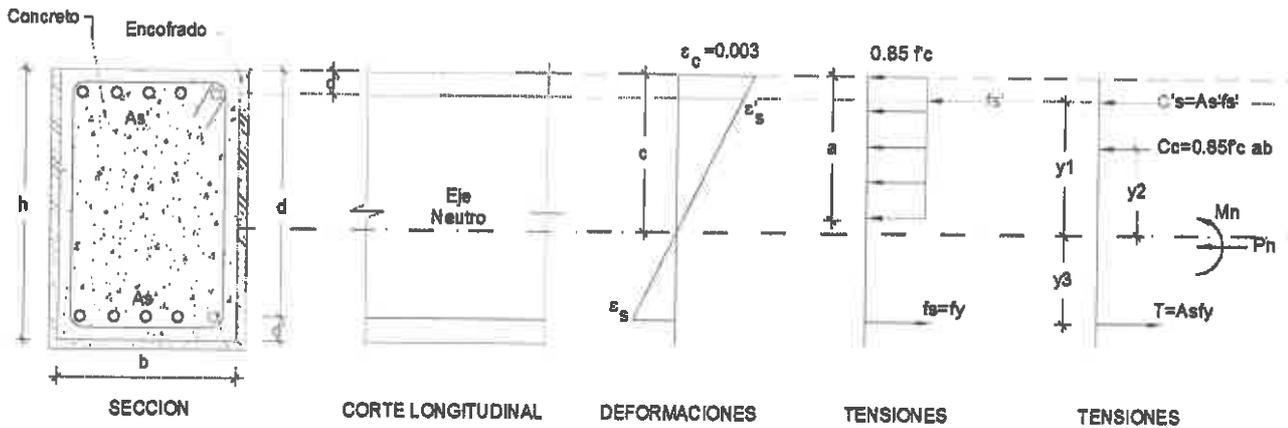


Figura 9. Análisis de viga arco corta de sección rectangular

Para determinar la ecuación que corresponde a la condición de falla por compresión, se asume un diagrama de deformaciones como el mostrado en la (figura 9), el cual genera los esfuerzos internos mostrados. La capacidad resistente del elemento estará dada por la resultante de las fuerzas desarrolladas en el acero y en el concreto. (29)

Por tanto:

$$P_n = 0.85f_c' ab + As'f_y' - Asf_y \quad (34)$$

La resistencia a la flexión cargada axialmente de acuerdo a la norma del ACI de la sección, y tomando en cuenta el brazo de excentricidad es:

$$\phi M_n = \phi \left[As'f_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) + 0.85f_c' \beta_1 cb \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + Asf_y \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right] \geq Mu$$

$$M_u - \phi \left[As' f_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) + 0.85 f_c' \beta_1 c b \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + As f_y \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right] \leq 0 \quad (36)$$

Además de saber que del acero en tracción y compresión entran en fluencia $f_s'=f_y$ y también por el armado simétrico tenemos $As=As'$, por equilibrio de fuerzas de acuerdo a la (figura 9) es:

$$P_n = 0.85 f_c' a b + As' f_y' - As f_y$$

$$P_u = 0.85 \phi f_c' a b \quad (37)$$

Despejando la variable a y para simplificar el cálculo también c :

$$a = \frac{P_u}{0.85 f_c' b} \quad (38)$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (39)$$

Por tanto simplificando las variables tenemos la siguiente restricción a la flexión uniaxial, reducida a las tres variables según la función objetivo:

$$g_2 = 0.425 \phi f_c' a^2 b - 0.425 \phi f_c' a b h + 2 \phi d' f_y A_s - \phi f_y h A_s + M_u \leq 0 \quad (40)$$

Donde d' es el recubrimiento de la viga en cm, que para este caso hemos considerado 7.5 cm para una presentación de acero en una sola capa.

Según el ACI 318-11 art. 10.2.7.3, β_1 equivale a 0.85 si $f_c' \leq 280$ Kgf/cm² y disminuye en 0.05 por cada 70 Kgf/cm² de aumento de f_c' , pero en general $0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85$.

2.2.2.4.4.3. RESTRICCIÓN POR CUANTÍA MÍNIMA

Los requerimientos de ductilidad para la cuantía mínima de acero $p_{min} = A_s/bd$, de acuerdo al Art. 10.9.1 del ACI 318-2011 limita a la cuantía mínima de acero para elementos

no compuestos a compresión a un valor de 0.01. La restricción de límite inferior de refuerzo puede ser escrita en función de las variables de diseño (figura 9) tomando $A_s = A_s'$, como:

$$A_{s_t} \geq A_{s_{min}} \quad (41)$$

$$g_3 = 0.01bh - 2A_s \leq 0 \quad (42)$$

2.2.2.4.4.4. RESTRICCIÓN POR CUANTÍA MÁXIMA

Los requerimientos de ductilidad para la cuantía máxima de acero $p_{max} = A_s/bd$, de acuerdo al Art. 10.9.1 del ACI 318–2011 limita a la cuantía máxima de acero para elementos no compuestos a compresión a un valor de 0.08. La restricción de límite superior de refuerzo puede ser escrita en función de las variables de diseño (figura 9) tomando $A_s = A_s'$, como:

$$A_{s_t} \leq A_{s_{max}} \quad (43)$$

$$g_4 = 2A_s - 0.08bh \leq 0 \quad (44)$$

2.2.2.4.4.5. RESTRICCIÓN POR DIMENSIONES

Según el Art. 21.6.1.2 del ACI 318–11 la relación entre la dimensión menor de la sección transversal y la dimensión perpendicular no debe ser menor que 0.4, y para este caso por facilidad de proceso constructivo consideramos de la siguiente forma:

$$\frac{b}{h} \geq 0.50 \quad (45)$$

$$g_5 = 0.5 - \frac{b}{h} \leq 0 \quad (46)$$

2.2.2.4.4.6. RESTRICCIÓN POR PANDEO

La evaluación de los efectos de esbeltez según el Art. 5.7.4.3. del LRFD–2012 para los elementos indesplazables, los efectos de la esbeltez se pueden

despreciar si KLu/r es menor que $34-12(M_1/M_2)$, siendo M_1 y M_2 el menor y el mayor momento de extremo, respectivamente, y el término (M_1/M_2) positivo para flexión de curvatura única.

$$\frac{K Lu}{r} \leq 34 - 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \quad (47)$$

Para determinar el valor de K existen los monogramas de Jackson y Moreland, pero hemos tomado en cuenta la recomendación del LRFD de acuerdo a la (tabla 5) para una flecha $F/Lu=0.20$ y el arco fijo o empotrado $K=0.70$ del Art. 4.5.3.2.2c del LRFD-2012.

La constante r que es el radio de giro de la sección transversal para una sección rectangular $r = \sqrt{I_g/A_g}$ se tomó como: $r=0.3h$ del ACI 318-11 Art. 10.10.1.2, que permite usar el valor aproximado de 0.30 en lugar de 0.289 para secciones rectangulares. ⁽¹⁹⁾

La constante Lu en cm es la semilongitud de la viga considerado en el cada tramo entre las columnas de recepción de carga, la hipótesis considerada es que esta trabaja rígidamente en cada tramo de columna como si fuese perfectamente empotrada en referencia a la zapata y con dirección hacia la clave del arco, esto se puede verificar con los diagramas de momento y fuerzas axiales resultantes de toda la viga arco. Reemplazando se tiene:

$$g_6 = 2.33 \frac{Lu}{h} - 34 + 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \leq 0 \quad (48)$$

De acuerdo a la sección 9.3.2.2 del ACI 318-11, el factor de resistencia ϕ no es constante y depende de la carga axial, este parámetro afecta tanto al momento nominal como a la carga axial de la viga-columna. Por lo tanto si $P_u \geq 0.10f_c'A_g$ se tiene que $\phi = 0.65$ para columnas

reforzadas con estribos. En caso de que $P_u < 0.10f_c'A_g$ se debe hacer una interpolación lineal entre 0.65 y 0.9 para obtener el valor de ϕ . Finalmente si $P_u = 0$ se tiene $\phi = 0.9$ que es el caso de flexión pura.

2.2.2.4.7. RESTRICCIONES DE BORDE

Para las variables b y h , se deben establecer los límites inferiores y superiores. La norma ACI 318–11 en su art. 21.6.1.1 limita la dimensión b a un valor mínimo de 30 cm en condiciones sísmicas para elementos sometidos a flexión y carga axial pertenecientes a pórticos resistentes a momento. Por otro lado el RNC-06 recomienda una sección mínima de 25 cm para h y b , disposiciones especiales para elementos resistente a fuerzas de sismo. ⁽³⁰⁾ Norma E.060 Art. 11.3. Por otro lado, los valores superiores pueden ser provistos con criterio práctico, por ejemplo limitando la base b a un valor máximo igual a 400 cm. y la altura h a 400 cm. Entonces se tienen los siguientes bordes:

$$30\text{cm} \leq b \leq 400\text{cm} \quad (49)$$

$$30\text{cm} \leq h \leq 400\text{cm} \quad (50)$$

2.2.2.4.5. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Las técnicas de optimización son usadas para encontrar los valores de las variables o de los parámetros de diseño, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, que de algún modo pueda ser definido como óptimo. Un caso simple puede ser la maximización o minimización de algún sistema característico que depende de x . En una formulación más avanzada la función objetivo $f(x)$ a ser minimizada o maximizada, podría ser sujeta a restricciones en la forma de restricciones de igualdad $G_i(x) = 0$; restricciones de

desigualdad $G_i(x) \leq 0$ y restricciones de borde, x_1 y x_u . Por lo tanto, el problema general puede ser formulado como:

$$\min_x f(x) \quad (51)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} G_i(x) &= 0 \quad i = 1, \dots, m_e \\ G_i(x) &\leq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (52)$$

Donde x es el vector de parámetros de diseño de tamaño n , $f(x)$ es la función objetivo cuyo resultado es un valor escalar y el vector $G(x)$ retorna un vector de longitud m que contiene los valores de las restricciones de igualdad y desigualdad evaluadas en x .

Una solución eficiente y precisa para este problema no solo depende del tamaño del problema en términos de variables de diseño y restricciones, sino también de las características de la función objetivo y de las restricciones. Cuando la función objetivo y las restricciones son funciones lineales de las variables de diseño, el problema es conocido como un problema de programación lineal (LP). Por otra parte, la Programación Cuadrática (QP) concierne a la minimización o maximización de una función objetivo cuadrática que es linealmente restringida. Para ambos problemas existen procedimientos disponibles de solución confiable. Lo más dificultoso de resolver es un problema de Programación No Lineal (NP) en el cual la función objetivo y las restricciones pueden ser funciones no lineales de las variables de diseño. Una solución para un problema NP requiere generalmente un proceso iterativo para establecer una dirección de búsqueda en cada iteración sucesiva. Esta solución es alcanzada usualmente por resolución de una programación lineal, una programación cuadrática o un subproblema no restringido.

2.2.2.4.5.1. ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA SECUENCIAL (SQP)

Basado en los trabajos de Biggs, Han y Powell - 2006, el método permite imitar estrechamente al método de Newton para optimización restringida justo como se hace para optimización no restringida. En cada iteración sucesiva, se hace una aproximación de la matriz Hessiana de la función Lagrangiana usando un método de actualización quasi-Newton. Este es usado para generar un subproblema QP cuya solución es usada para formar una dirección de búsqueda por un procedimiento de búsqueda lineal.

Dado el problema descrito en (51) y (52) la idea principal es la formulación de un subproblema QP basado en una aproximación cuadrática de la función de Lagrange:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) \quad (53)$$

Simplificando el problema general dado en (51) y (52) y asumiendo que ambas restricciones han sido expresadas como restricciones de desigualdad, se obtiene un subproblema QP linerizando las restricciones no lineales.

El subproblema de programación cuadrática QP puede ser planteado de la siguiente forma:

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} d^T H_K d + \nabla f(x_k)^T d$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \quad (54)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m$$

Donde el operador ∇ indica el gradiente la función dada, y d es la diferencia entre dos puntos solución sucesivos.

Este subproblema puede ser resuelto usando cualquier algoritmo QP. La solución es usada para formar una nueva iteración:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (55)$$

El parámetro de tamaño de paso α_k es determinado por un procedimiento apropiado de búsqueda lineal de modo que un decremento suficiente es obtenido en una función de mérito. La matriz H_k es una aproximación definida positiva de la matriz Hessiana de la función de Lagrange (53). H_k puede ser actualizada por cualquiera de los métodos quasi-Newton, aunque el método de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) es el más usado.

Un problema restringido no linealmente puede ser a menudo resuelto en menos iteraciones que un problema no restringido usando el algoritmo SQP. Una de las razones para esto, es que debido a los límites del área factible, el optimizador puede tomar decisiones respecto a las direcciones de búsqueda y tamaño del paso.

La implementación SQP consiste de tres etapas principales: actualización de la matriz Hessiana, solución de la programación cuadrática, búsqueda lineal y evaluación de la función de mérito.

2.2.2.4.5.2. ACTUALIZACIÓN DE LA MATRIZ HESSIANA

En cada iteración sucesiva se calcula una aproximación quasi-Newton del Hessiano de la función Lagrangiana H , usando el método BFGS, donde λ_i ($i = 1, \dots, m$) es un estimado de los multiplicadores de Lagrange.

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k^T s_k H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (56)$$

Donde:

$$s_k = x_{k+1} - x_k$$

$$q_k = \left(\nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_{k+1}) \right) - \left(\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_k) \right) \quad (57)$$

Es recomendable mantener el Hessiano definido positivo igual aunque puede ser indefinido positivo en el punto solución. El Hessiano definido positivo se mantiene procurando que $q_k^T s_k$ sea positivo en cada actualización y que H sea inicializado con una matriz definida positiva. Cuando $q_k^T s_k$ no es positivo, q_k es modificado elemento a elemento tal que $q_k^T s_k > 0$. El objetivo general de esta modificación es para deformar los elementos de q_k , lo cual contribuye a una actualización definida positiva, tan pequeña como sea posible. Por lo tanto, en la fase inicial de la modificación, el elemento más negativo de $q_k * s_k$ es repetidamente reducido a la mitad. Este procedimiento se continúa hasta que $q_k^T s_k$ es mayor o igual a una tolerancia negativa pequeña. Si, después de este procedimiento, $q_k^T s_k$ es aun no negativo, se modifica q_k adicionando un vector v multiplicando por un escalar constante w , esto es:

$$q_k = q_k + wv \quad (58)$$

Donde:

$$v_i = \nabla g_i(x_{k+1}) \cdot g_i(x_{k+1}) - \nabla g_i(x_k) \cdot g_i(x_k)$$

$$\text{si } (q_k)_i \cdot w < 0 \text{ y } (q_k)_i \cdot (s_k)_i < 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (59)$$

$$v_i = 0 \text{ en otro caso}$$

Incrementando w sistemáticamente hasta que $q_k^T s_k$ llega a ser positivo.

2.2.2.4.5.3. SOLUCIÓN DE PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA

En cada iteración sucesiva del método SQP, un problema QP de la siguiente forma es resuelto, donde A_i se refiere a la fila i de la matriz A de tamaño $m \times n$.

$$\begin{aligned} \min_{d \in \mathbb{R}^n} q(d) &= \frac{1}{2} d^T H d + c^T d \\ A_i d &= b_i, \quad i = 1, \dots, m_e \\ A_i d &\leq b_i, \quad i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (60)$$

El procedimiento de solución involucra dos fases. La primera fase envuelve el cálculo de un punto confiable (si existe). La segunda fase hace la generación de una secuencia iterativa de puntos confiables que convergen hasta la solución. En este método un conjunto activo (active set), \overline{A}_k , es mantenido ya que este es un estimado de las restricciones activas (aquellas que están sobre las restricciones de borde) en el punto solución. Virtualmente todos los algoritmos QP son métodos de conjunto activo. Este punto es enfatizado debido a que existen muchos métodos diferentes que son muy similares en estructura pero que son descritos en términos ampliamente diferentes.

2.2.2.4.5.4. BÚSQUEDA LINEAL Y FUNCIÓN DE MÉRITO

La solución del subproblema QP produce un vector d_k , el cual es usado para formar la iteración:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (61)$$

El parámetro de tamaño de paso α_k es determinado en orden de producir un decremento suficiente en una función mérito. La siguiente función de mérito es usada en esta implementación (Matworks Inc., 2009):

$$\Psi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m_e} r_i \cdot g_i(x) + \sum_{i=m_e+1}^m r_i \cdot \max[0, g_i(x)] \quad (62)$$

Recomiendan preparar el parámetro de penalización con:

$$r_i = (r_{k+1})_i = \max\left\{\lambda_i, \frac{(r_k)_i + \lambda_i}{2}\right\}, \quad i = 1, \dots, m \quad (63)$$

Esto permite una contribución positiva de las restricciones que son inactivas en la solución QP pero son recientemente activas. En esta implementación, el parámetro de penalización r_i es inicialmente:

$$r_i = \frac{\|\nabla f(x)\|}{\|\nabla g_i(x)\|} \quad (64)$$

Donde $\| \quad \|$ representa la norma Euclidiana. Esto asegura grandes contribuciones para el parámetro de penalización de las restricciones con pequeños gradientes, el cual debe ser el caso para restricciones activas en el punto solución.

2.3. HIPÓTESIS

La aplicación de la Programación Cuadrática Secuencial incide en la optimización por diseño de costo mínimo en las secciones transversales de la viga principal en un puente tipo arco de concreto armado.

2.4. VARIABLES DE ESTUDIO

En el presente estudio investigación se identificaron y se consideró las siguientes variables de estudio:

2.4.1. VARIABLE INDEPENDIENTE:

La Técnica de Programación Cuadrática Secuencial (SQP).

2.4.2. VARIABLE DEPENDIENTE:

El costo de la sección transversal de la viga principal del puente tipo arco de concreto armado.

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES
Costo de la sección transversal de la viga principal del puente tipo arco de concreto armado.	Pre dimensionamiento y diseño de la viga principal	base (b)
		altura (h)
		área de acero (As)
	Optimización del costo de las secciones de la viga principal	costo de encofrado
		costo de concreto
		costo de acero
	Verificación y comportamiento estructural de la viga principal	desplazamiento vertical de la sección transversal

Tabla 6. Dimensiones e indicadores de la Variable Dependiente

2.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

2.5.1. ALCANCES

Se tiene por conocimiento, además el cual se pudo comprobar que el elemento de construcción que mejor se comporta a esfuerzos de compresión es el concreto y por ende uno de los elementos estructurales que por geometría transmite todas las sollicitaciones de carga aplicados a esfuerzos en mayor parte de sólo compresión es una viga en arco.

En la actualidad tenemos muchas herramientas de optimización como son algoritmos de optimización matemática y algoritmos heurísticos, los cuales están ya desarrollados en muchos lenguajes de programación de software convencionales y como también en software libres como el Python.

2.5.2. LIMITACIONES

Una de las limitaciones para el diseño de puentes tipo arco de concreto armado es pues la falta de bibliografía ya que existen pocos autores e investigaciones referente al tema en mención.

Para el caso de las herramientas de optimización se puede mencionar que hay falta de traducción de muchos libros avanzados referentes a la optimización de estructuras en general.

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en el departamento de Huancavelica, el cual se encuentra ubicado en la región centro-sur del Perú, que limita por el norte con el departamento de Junín, por el este con el departamento de Ayacucho, por el sur con el departamento de Ica y por el noroeste con el departamento de Lima.

El lugar denominado para el presente proyecto es Sotoccmachay que unirá la carretera Huancavelica – Huancayo con el barrio de San Cristóbal, para el planteamiento se realizó desde el pontón Villa Agraria hasta el lugar denominado Villacariño y Tres Boas ubicado en la progresiva Km 1+274.00.

Esta alternativa también es considerando como solución a una vía alterna de acceso a la ciudad de Huancavelica por la prolongación de la Av. 28 de Abril.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo al fin que persigue es **EXPLICATIVO**, es porque se asume la manipulación de una de las variables de investigación; porque ya existen enfoques teóricos acerca de las variables, además de que se descubre y comprueba la asociación entre variables.

3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio de investigación arribó hasta un nivel **APLICADO**, porque la problemática es reflejada en la realidad, siendo modelado esta mediante programas de simulación de cómputo como alternativa de aplicación y cumpliéndose todos los parámetros necesarios de acuerdo a las normas vigentes.

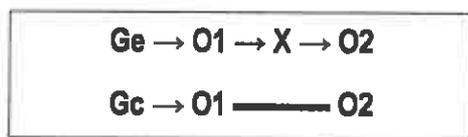
3.4. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El estudio utilizó el método **DEDUCTIVO**, porque se parte de situaciones generales explicadas por un marco teórico general y las aplicaremos en una realidad concreta (nuestro objeto de investigación).

3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se utilizó el Diseño de Investigación **CUASI EXPERIMENTAL**, es Cuasi Experimental porque los sujetos que conforman los grupos no son tomados al azar, ni apareados, sino que se consideran a grupos intactos, es decir a grupos que ya están conformados desde antes del experimento. Son estudios experimentales que no cumplen con el requisito de control de las variables a través de un grupo control o de la asignación aleatoria, o ambos.

El propósito de este diseño es determinar si la aplicación de la variable independiente produce un cambio en la variable dependiente.



G_e = Grupo Experimental

G_c = Grupo de Control

O_1 = Pre Test

O_2 = Post Test

X = Tratamiento o Estímulo con el SQP

3.6. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.6.1. POBLACIÓN

La población está conformado principalmente por secciones de la viga principal del puente tipo arco de concreto armado, arco que es del tipo parabólico con sección rectangular variable que tiene una luz de 74 m y flecha de 14.80 m.

Esta viga se dividió en 41 secciones (estaciones idealizadas) esto por una razón ya que en nuestra viga en arco sus secciones varían más o menos uniforme desde la clave hasta el estribo (arcos primarios), estas son a partir de la estación 01 hasta la estación 41 con respecto a la coordenada "x", de los cuales se obtuvo 40 elementos viga (frame) de 1.85 metros de longitud en "x"; las estaciones para la coordenada "y" son el resultado de la estación "x" ya que esta depende de la otra.

3.6.2. MUESTRA

Por la simetría de la viga arco se tomaron los valores hasta la estación 21 que es el centro del claro, y como ya es sabido el resto de las estaciones se repiten como espejo.

La muestra tomada para el diseño de la viga arco fueron ocho (08) secciones transversales (estaciones), estas ocho estaciones o nudos son las más representativas por cuestiones de solicitación de carga para la viga en arco, puesto que en estas estaciones se muestran los momentos máximos y mínimos de nuestra viga en arco, estas estaciones se pudieron contrastar con los resultados de los diagramas mostrados con el SAP-2000.

3.6.3. MUESTREO

Se utilizó el **Método Empírico o No Probabilístico**, porque la composición de la muestra resulta de una "elección razonada" donde se seleccionan las unidades muestrales aplicando ciertas reglas basadas, ya sea en las características de las muestras y/o en una simulación de elección aleatoria de los instrumentos que deben figurar en la muestra.

La selección de la muestra es a través del diseño muestral de tipo aleatorio simple porque trabaja con una cifra entera, los resultados de su aplicación se pueden generalizar a la población.

3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas para la recolección de datos que se utilizaron en la ejecución del presente trabajo de investigación fueron:

TECNICA	INSTRUMENTO
Análisis documental	Guías de análisis documental y contenido (Libros, normas y reglamentos)
Observación	Guías de observación y observación directa (Reportes de resultados obtenidos y comparación)

Tabla 7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.8. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la recolección de datos se tuvo en cuenta los siguientes pasos:

- Se estructuró los instrumentos de recolección de datos.
- Se sometió a la evaluación por expertos (validez subjetiva).
- Se aplicó los instrumentos de recolección (validez objetiva).
- Por último se organizó los datos obtenidos para su análisis estadístico correspondiente.

3.9. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.9.1. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO

Las técnicas de procesamiento de datos utilizadas fueron:

- Medidas de tendencia central.
- Medidas de dispersión.

3.9.2. ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de datos se utilizaron las siguientes herramientas:

- Tabulación de datos y ecuaciones de regresión.
- Interpretación de cuadros estadísticos.

- Gráficos estadísticos.

Los modelos de análisis de datos obtenidos fueron los siguientes:

- Modelo hermenéutico. Se procedió al análisis, discusión e interpretación en función a la teoría obtenida en la investigación, reflejando de esta manera la hipótesis planteada.
- Modelo estadístico. Para inferir los resultados a través de la aplicación de la estadística descriptiva.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1. PROCEDIMIENTO SENCILLO PARA OPTIMIZACIÓN DE UNA VIGA EN ARCO DE CONCRETO ARMADO

El procedimiento de optimización ha sido adaptado de J. Borda Flores y G. Rodríguez y pasa por las siguientes etapas:

1.- A partir de los requerimientos y las solicitaciones de carga, se procede a obtener los resultados por predimensionado o por diseño tradicional, de acuerdo a las recomendaciones que provee el reglamento ACI 318-11 y la Norma LRFD-2012.

2.- Determinar las solicitaciones internas en cada elemento como pueden ser: fuerzas axiales y momentos flectores; mediante métodos tradicionales, por elementos finitos (FEM), métodos matriciales; que están disponibles en programas computacionales comerciales como el SAP 2000, CSI BRIDGE, etc.

3.- Construcción de la función objetivo y restricciones de acuerdo al planteamiento hecho a partir de los datos del problema.

4.- Resolución del problema de optimización para encontrar una solución global o por lo menos un mínimo local, empleando la técnica de programación cuadrática secuencial (SQP) con el Optimtool del Matlab R2013a.

5.- Ensayar sobre la solución obtenida (óptima) un criterio de detención del procedimiento hasta que se cumpla con un valor de tolerancia para la función objetivo y restricciones, como también un sinceramiento y corrección para la validación de los datos obtenidos.

6.- Corroborar el comportamiento estructural final del puente en arco de acuerdo a los requerimientos y exigencias de la Norma LRFD-2012.

7.- Finalmente calcular el costo total de la viga y el puente tipo arco de concreto armado, con la ayuda de los planos elaborados en Civil3D y hojas de cálculo para metrados y presupuesto.

4.1.2. PREDIMENCIONADO Y GEOMETRÍA

De acuerdo a la topografía se pudo conseguir un tramo con la distancia más corta de 99.90 m de luz del tablero para el puente y se presentó para el centro del claro una estructura de viga en arco de 74 metros con una flecha de 14.80 metros por tanto la relación $n=f/L$ es de $n=0.20$ geometría. Para el diseño de la viga en arco se dividieron en 41 estaciones con 40 elementos "frame" de 1.85 m de longitud horizontal cada uno.

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS GEOMETRICOS DE ARCOS PRIMARIOS

Luz de diseño = 74.00 Clave de arco: eo = 1.50 Arranque de arco: ϵ 3.50
 Flecha = 14.80 Constante de arco: K = 0.10 $n=f/L = 0.2$

EST.	COORDENADAS		ANGULO INCLINADO		COSENO	$1-(1-k)2y/L$	PERALTE	COORD. INTRADOS		COORD. EXTRADOS	
	X	Y	ϕ	grad	cos ϕ		e (m)	X	Y	X	Y
1	0.00	0.000	0.675	38.66	0.781	0.101	3.50	1.093	-1.367	-1.093	1.367
2	1.85	1.443	0.650	37.23	0.796	0.146	3.08	2.780	0.219	0.920	2.667
3	3.70	2.812	0.624	35.75	0.812	0.191	2.79	4.516	1.678	2.884	3.946
4	5.55	4.107	0.597	34.22	0.827	0.236	2.59	6.277	3.037	4.823	5.177
5	7.40	5.328	0.569	32.62	0.842	0.281	2.43	8.054	4.306	6.746	6.350
6	9.25	6.475	0.540	30.96	0.857	0.326	2.30	9.840	5.491	8.660	7.459
7	11.10	7.548	0.510	29.25	0.873	0.371	2.19	11.634	6.595	10.566	8.501
8	12.95	8.547	0.480	27.47	0.887	0.416	2.09	13.433	7.619	12.467	9.475
9	14.80	9.472	0.448	25.64	0.902	0.460	2.01	15.235	8.566	14.365	10.378
10	16.65	10.323	0.415	23.75	0.915	0.505	1.94	17.041	9.435	16.259	11.211
11	18.50	11.100	0.381	21.80	0.928	0.550	1.88	18.848	10.229	18.152	11.971
12	20.35	11.803	0.346	19.80	0.941	0.595	1.82	20.658	10.947	20.042	12.659
13	22.20	12.432	0.310	17.74	0.952	0.640	1.77	22.470	11.590	21.930	13.274
14	24.05	12.987	0.273	15.64	0.963	0.685	1.72	24.282	12.157	23.818	13.817
15	25.90	13.468	0.236	13.50	0.972	0.730	1.68	26.096	12.651	25.704	14.285
16	27.75	13.875	0.197	11.31	0.981	0.775	1.64	27.911	13.069	27.589	14.681
17	29.60	14.208	0.159	9.09	0.987	0.820	1.61	29.727	13.413	29.473	15.003
18	31.45	14.467	0.119	6.84	0.993	0.865	1.58	31.544	13.684	31.356	15.250
19	33.30	14.652	0.080	4.57	0.997	0.910	1.55	33.362	13.880	33.238	15.424
20	35.15	14.763	0.040	2.29	0.999	0.955	1.52	35.180	14.002	35.120	15.524
21	37.00	14.800	0.000	0.00	1.000	1.000	1.50	37.000	14.050	37.000	15.550

Tabla 5: Peraltes de la viga arco para el diseño de Arcos Primarios

Los valores con el método de Arcos Primarios para nuestro diseño y predimensionado de la viga en arco (tabla 8), tiene como arranque del arco 3.50 m y clave del arco de 1.50 m, por tanto la constante del arco en función a los peraltes es de $K=0.10$.

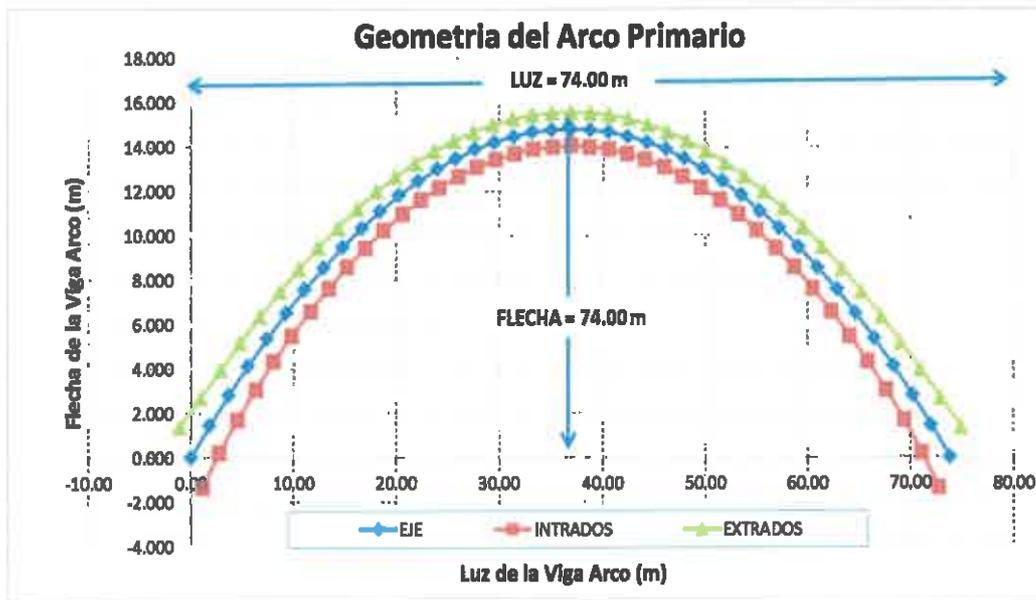


Figura 10. Geometría del Arco Primario para una constante de arco $K=0.10$

4.1.3. RESULTADOS DE SOLICITACIONES INTERNAS CON EL SAP 2000

La metodología del modelado con el SAP-2000 fue que se plantearon cuatro "lanes" o ejes de recorrido de la carga vehicular para el caso más desfavorable en cuanto a la ubicación de estas con referencia al arco derecho: esto es a una distancia de 0.60 m del muro Jersey de protección y a 1.20 m de separación para las líneas de rueda de dos vehículos contiguos en doble sentido.

Las líneas de influencia para la viga arco del elemento frame 01 con el cual se puede observar la forma en el cual se aprecia las cuatro líneas de rueda para las cargas vivas:

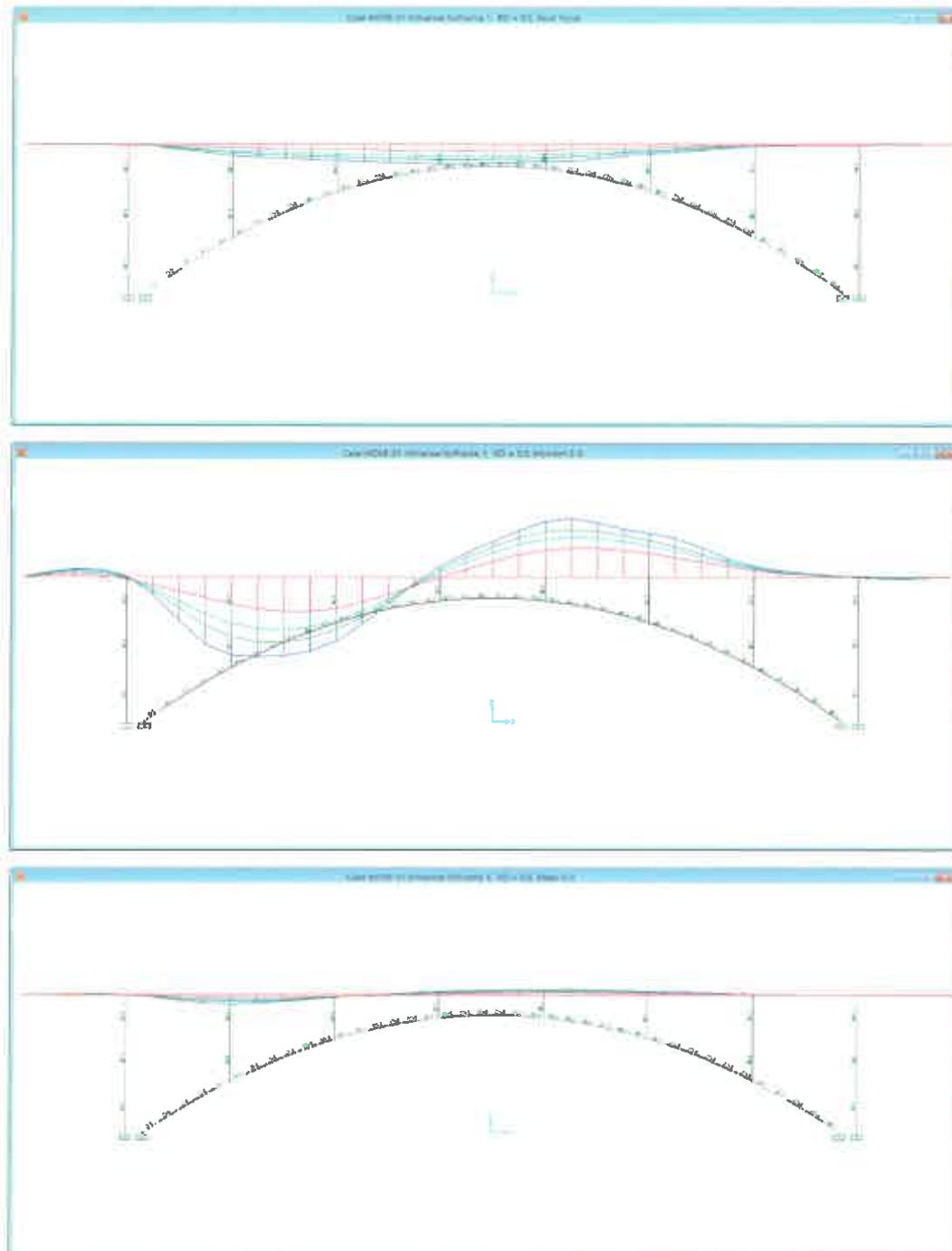


Figura 11. Líneas de influencia para el FRAME 01 para Axial, Momento y Cortante.

Las líneas de influencia para la viga arco del elemento frame 20, las gráficas muestran la repartición equitativa de las líneas de influencia ya que este elemento se encuentra muy cercano a la mitad del claro:

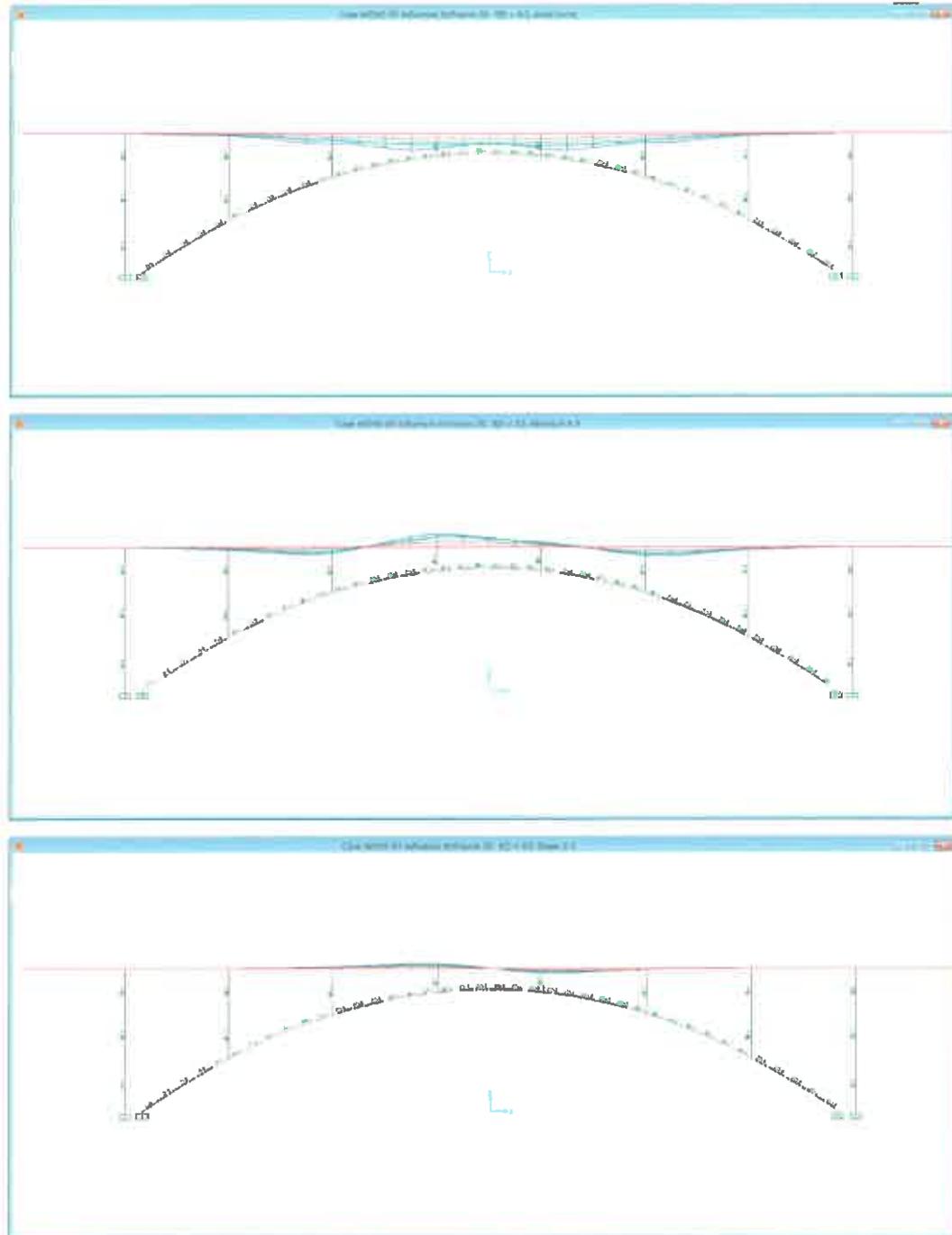


Figura 12. Líneas de Influencia para el FRAME 20 para Axial, Momento y Cortante.

De acuerdo a los requerimientos de RESISTENCIA I, el resumen de la envolvente para fuerzas axiales, momentos flectores y fuerzas cortantes son:

FRAME	COMBINAC.	Pu MAX (Tonf)	Pu MIN (Tonf)	M2u MIN (Tonf-m)	M2u MAX (Tonf-m)	M3u MIN (Tonf-m)	M3u MAX (Tonf-m)	V2u MIN (Tonf)	V2u MAX (Tonf)	Lu (m)
1	RESIS-I	-1548.108	4.371	-19.960	13.227	-1741.812	832.813	-182.029	73.884	37
2	RESIS-I	-1516.551	4.226	-14.175	11.572	-1388.412	876.182	-173.178	64.218	
3	RESIS-I	-1488.892	4.671	-12.185	10.815	-1068.571	898.885	-174.388	69.297	36.3
4	RESIS-I	-1486.518	3.908	-10.392	8.899	-745.821	405.982	-179.886	54.376	
5	RESIS-I	-1445.482	3.738	-9.208	8.605	-448.384	294.817	-188.400	48.408	
6	RESIS-I	-1347.631	1.881	-9.006	16.151	-234.388	303.886	-45.410	58.988	27.75
7	RESIS-I	-1333.743	1.833	-8.739	14.118	-190.838	224.759	-51.574	48.143	
8	RESIS-I	-1321.044	1.815	-4.732	12.691	-173.135	182.888	-59.808	35.160	
9	RESIS-I	-1308.305	1.814	-3.861	12.896	-175.779	175.954	-76.191	28.888	22.2
10	RESIS-I	-1288.212	1.813	-4.477	14.088	-179.416	239.432	-83.073	23.888	
11	RESIS-I	-1267.580	1.812	-5.893	15.776	-173.873	366.888	-112.725	20.007	
12	RESIS-I	-1229.431	1.703	-14.798	13.688	-175.808	815.947	-18.834	81.208	16.85
13	RESIS-I	-1224.082	1.708	-10.734	11.414	-188.851	352.102	-22.282	81.121	
14	RESIS-I	-1218.784	1.707	-7.088	10.078	-207.133	242.574	-28.022	59.919	
15	RESIS-I	-1213.488	1.706	-5.372	10.574	-215.512	175.843	-48.018	28.882	11.1
16	RESIS-I	-1207.952	1.702	-5.899	12.742	-208.329	172.228	-72.095	28.349	
17	RESIS-I	-1202.131	1.696	-8.945	15.172	-191.075	282.621	-99.345	23.323	
18	RESIS-I	-1186.287	1.206	-10.539	19.796	-188.503	383.578	-22.218	96.550	5.55
19	RESIS-I	-1185.959	1.193	-8.931	18.543	-153.488	208.218	-27.442	68.513	
20	RESIS-I	-1185.280	1.184	-4.154	13.884	-177.244	123.842	-33.649	41.868	
21	RESIS-I	-1184.912	1.184	-2.846	11.784	-152.084	54.503	-48.862	41.888	5

Tabla 9. Envolvente para el requerimiento RESISTENCIA I con el SAP-2000

Combinación = Resistencia I

$$RI = \gamma_{PDC} \cdot Q_{PDC} + \gamma_{PDW} \cdot Q_{PDW} + \gamma_{LL+IM} \cdot Q_{LL+IM}$$

De acuerdo a la norma LRFD los factores de carga son:

$$RI = 1.25 \cdot Q_{PDC} + 1.50 \cdot Q_{PDW} + 1.75 \cdot Q_{LL+IM}$$

Para el caso de la Carga Viva:

Carga vehicular= HL-93

Impacto por carga vehicular IM = 33%

Carga peatonal = 360 kgf/m

Donde:

- Pu = Carga axial última (en Tonf)
- M2u = Momento último en el eje secundario (Tonf-m)
- M3u = Momento último en el eje principal (Tonf-m)
- V2u = Cortante último en el eje principal (Tonf)
- V3u = Cortante último en el eje secundario (Tonf)
- Tu = Momento torsor último (Tonf-m)
- Lu = Semilongitud de viga arco a partir de la estación (m)

Para la muestra se tomó a partir de las estaciones obtenidas ocho (08) estaciones las cuales podemos mencionar: las estaciones 01, 06, 12 y 18 en las filas resaltadas de color amarillo, la primera estación es empotrada a la zapata y las siguientes tres son arriostradas a columnas que le transmiten cargas puntuales a nuestra viga en arco; y las estaciones 03, 09, 15 y 21 en las filas resaltadas de color verde, son aquellas que se encuentran en los tramos intermedios entre aquellos elementos arriostrados especificados líneas arriba.

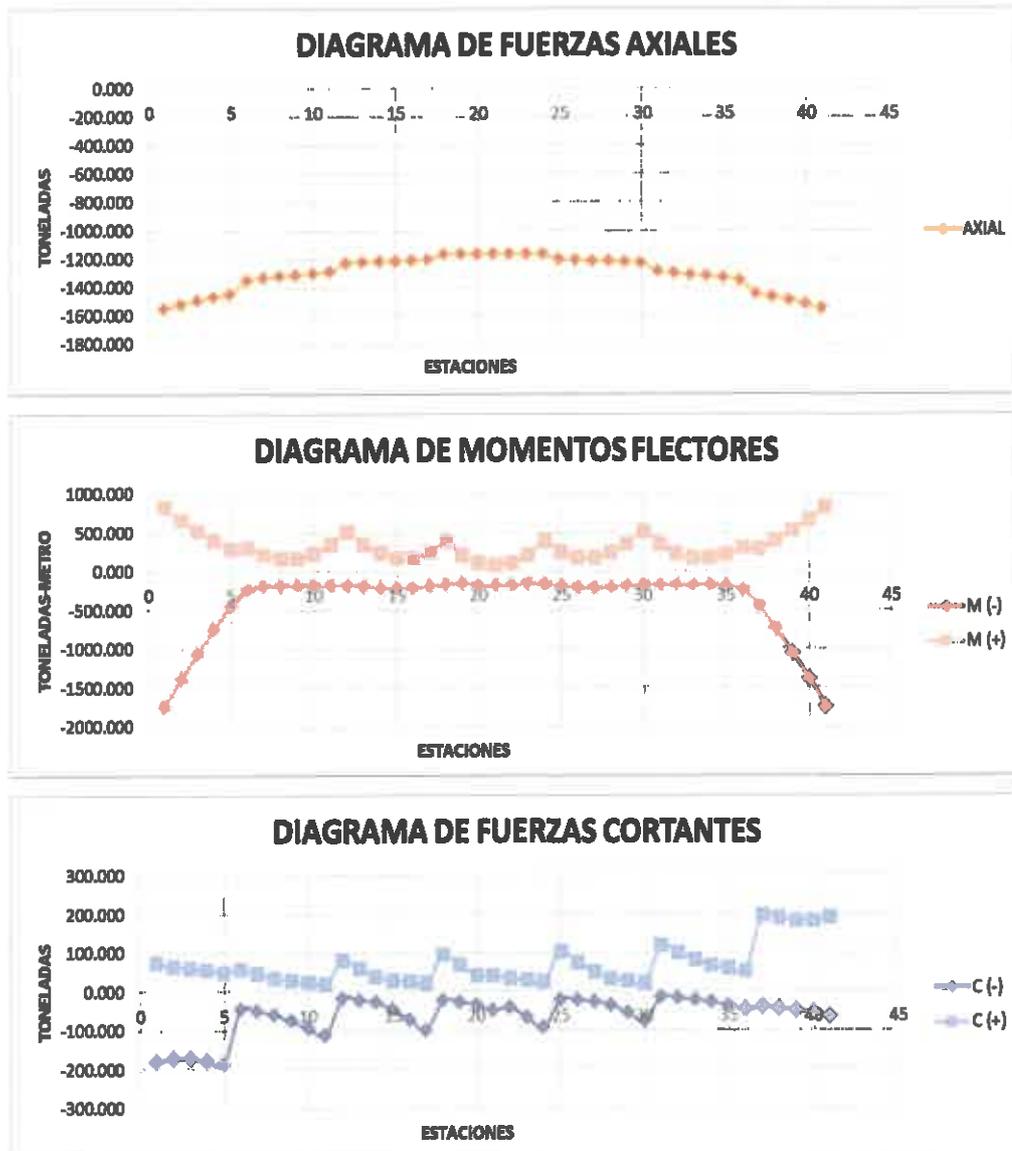


Figura 13. Grafica de Fuerzas Axiales, Momentos Flectores y Fuerzas Cortantes.

Es necesario mencionar que para los efectos de temperatura se consideró un incremento de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para aquellos esfuerzos de deformación.

Como se aprecia en (Figura 13) las gráficas de axiales, momentos y cortantes muestran los cambios y variaciones en los puntos de arriostamiento como son las columnas puesto que estas transmiten cargas puntuales considerables a la estructura principal que es la Viga en Arco.

En los diseños tradicionales los estructuristas plantean los diagramas uniformizando todas las cargas sean cargas muertas, cargas vivas y cargas vehiculares (método de invariantes), esto solo puede cumplirse para el caso de su peso propio de la viga arco pero ya es sabido que esta es una carga del tipo parabólica; en dichos diseños tradicionales nunca tomaron en cuenta la presencia de las columnas y que con estas muestran un comportamiento diferente de acuerdo a las solicitaciones de carga requeridas.

4.1.4. CONSTRUCCIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Del análisis obtenido en el capítulo 2.2.2.4.2. la función objetivo final es:

$$\min F = C_c b h + 2 C_s A_s + C_f (b + 2 h)$$

Para el análisis de la función objetivo se determinó los parámetros de la siguiente manera:

PARAMETROS	VIGA ARCO
Concreto $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$ (Sl. /m ³)	419.26
C_c (Sl. /cm ² /m)	0.041926
Acero $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ (Sl. /kg)	4.54
C_s (Sl. /cm ² /m)	3.5639
Encofrado (Sl. /m ²)	457.00
C_f (Sl. /cm ² /m)	4.57

Tabla 10. Parámetros de costo por metro lineal de viga tipo arco.

Los costos tanto para el concreto y el acero se tomaron con referencia al expediente técnico “Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Huancavelica – Lircay, Tramo Km 1+550 (Av. Los Chancas) - Lircay”; recalando que el peso específico para el acero es de 7850 kgf/m³. Para el caso del encofrado también se utilizó los costos de dicho expediente. ⁽³¹⁾

Se realizó una adaptación del parámetro de Encofrado para la partida de "Encofrado y desencofrado para puentes" ya que para un análisis de costos unitarios la cantidad de madera está en función a la cantidad de usos de la madera puesto que para este tipo de partida es de un solo uso.

Ramos Salazar en su libro Costos y Presupuestos en Edificación, menciona que el aporte unitario de materiales para encofrados y andamios, en la sección encofrado de vigas cara vista típicas, la cantidad del uso de la madera es de seis a diez usos. (32)

4.1.5. RESULTADOS Y GRÁFICAS CON EL SQP

Los resultados para un diseño tradicional según los requerimientos del ACI-318S-2011 y para cada estación representativa son los que se muestra a continuación.

REPORTES FINALES DE DISEÑO

Datos:	Fluencia del acero:	$f_y =$	4200 kg/cm ²
	Resistencia a comp:	$f'_c =$	280 kg/cm ²
	Recubrimiento una	$d_1 =$	7.5 cm
	Constante	$B_1 =$	0.85

Estación Parámetro	VIGA ARCO (DISEÑO TRADICIONAL)							
	1	3	6	9	12	15	18	21
Pu (Kgf)	1.55E+06	1.49E+06	1.35E+06	1.31E+06	1.23E+06	1.21E+06	1.17E+06	1.16E+06
Mu (Kgf-cm)	1.86E+08	1.13E+08	3.26E+07	1.92E+07	5.62E+07	2.43E+07	4.06E+07	1.91E+07
b (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
h (cm)	350	279	230	201	182	168	158	150
As=A's (cm ²)	262.5	209.25	172.5	150.75	136.5	126	118.5	112.5
p	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
a (cm)	66.714	64.204	58.074	56.423	52.980	52.295	50.261	50.200
c (cm)	78.487	75.535	68.322	66.380	62.329	61.523	59.130	59.059
ϕ	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
ϕP_n (kgf)	7.58E+06	6.04E+06	4.98E+06	4.35E+06	3.94E+06	3.64E+06	3.42E+06	3.25E+06
ϕM_n (kgf-cm)	4.59E+08	3.11E+08	2.17E+08	1.71E+08	1.42E+08	1.23E+08	1.09E+08	9.96E+07
δ_b	-	-	-	-	-	-	-	-
DCO (S/. /m)	7956.663	6481.655	5463.693	4861.225	4466.505	4175.658	3967.911	3801.713
Nº Iteraciones	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 11. Valores del cálculo para un diseño Tradicional.

Donde:

P_u = Solicitación de Fuerza axial última

M_u = Solicitación de Momento flector último

$b = (x_1)$ = base de la viga

$h = (x_2)$ = altura de la viga

$A_s = (x_3)$ = Area de acero

$\rho = A_s/(bh)$ =cuantía del acero

a = altura de la viga considerada a compresión

c = distancia desde el eje neutro de la viga hasta la fibra extrema superior

ϕ = factor de reducción por diseño a compresión

ϕP_n = fuerza axial nominal que puede soportar la viga

ϕM_n = momento flector nominal que puede soportar la viga

DCO = diseño de costo óptimo

Con la implementación y utilización del SQP del Toolbox del Matlab se pudieron optimizar estos valores como se muestra a continuación, además se muestra otra forma de ingreso en lugar de la sintaxis normal utilizando el Optimtool el cual facilita la forma de ingreso y como también las salidas de los resultados:

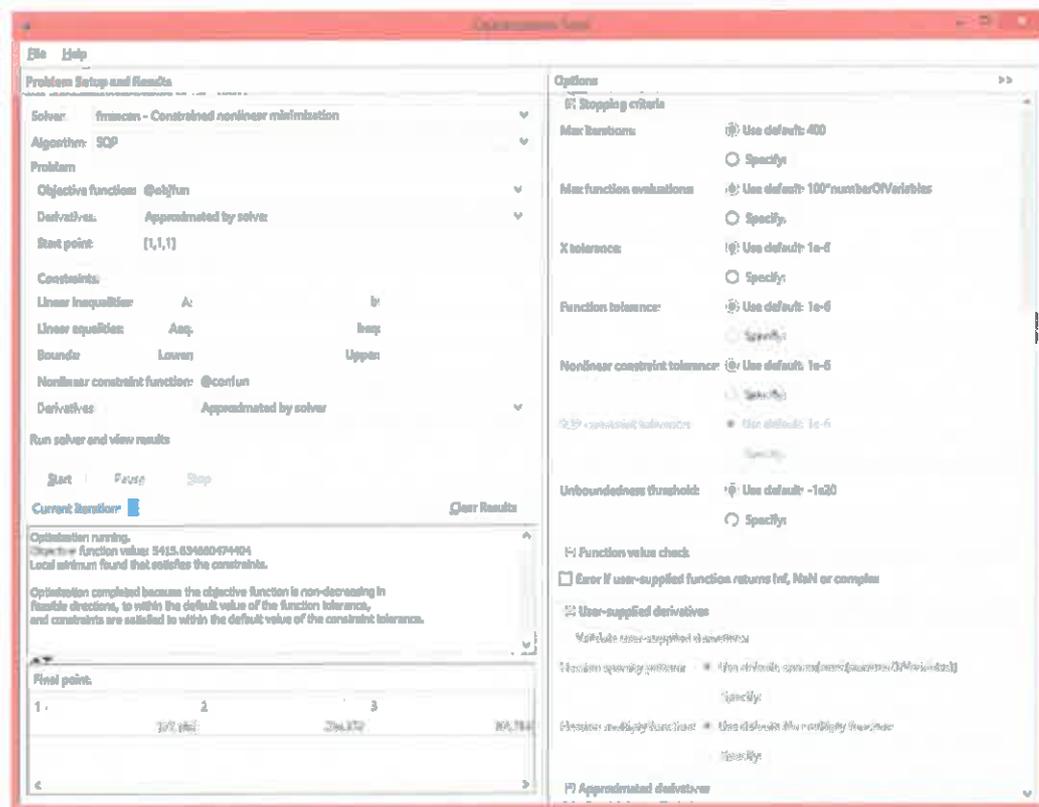


Figura 14. Salida de los resultados con el SQP del Matlab.

Con esta primera salida (figura 14) se observa el resultado que se obtuvo en la octava iteración para la búsqueda de la función objetivo y como también se observan los parámetros de ajuste para las salidas de los resultados con el SQP.

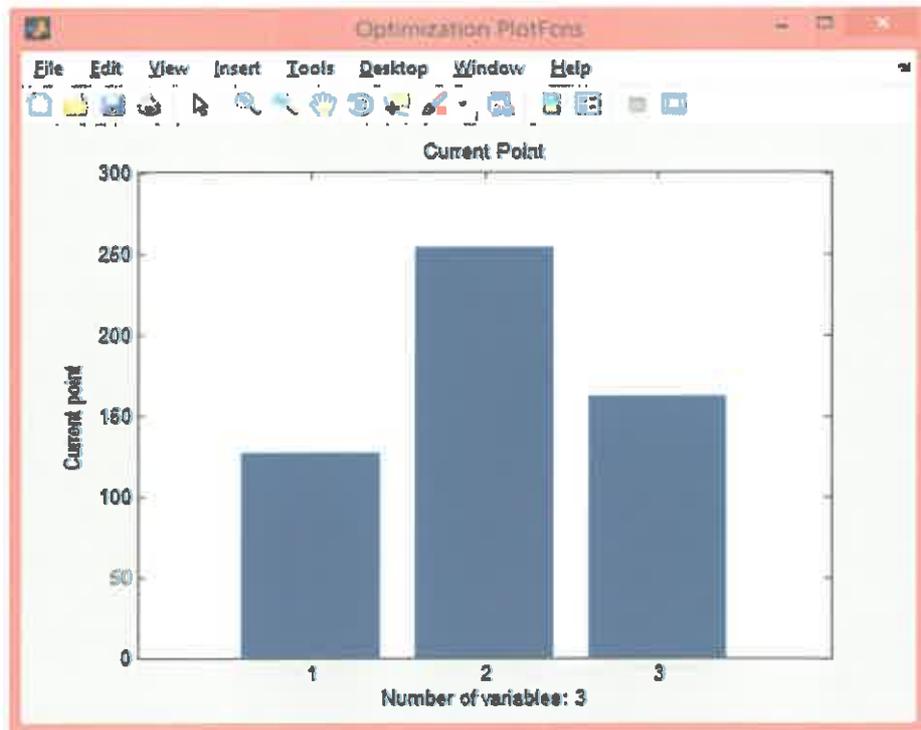


Figura 15. Salida del SQP para el punto actual de las variables.

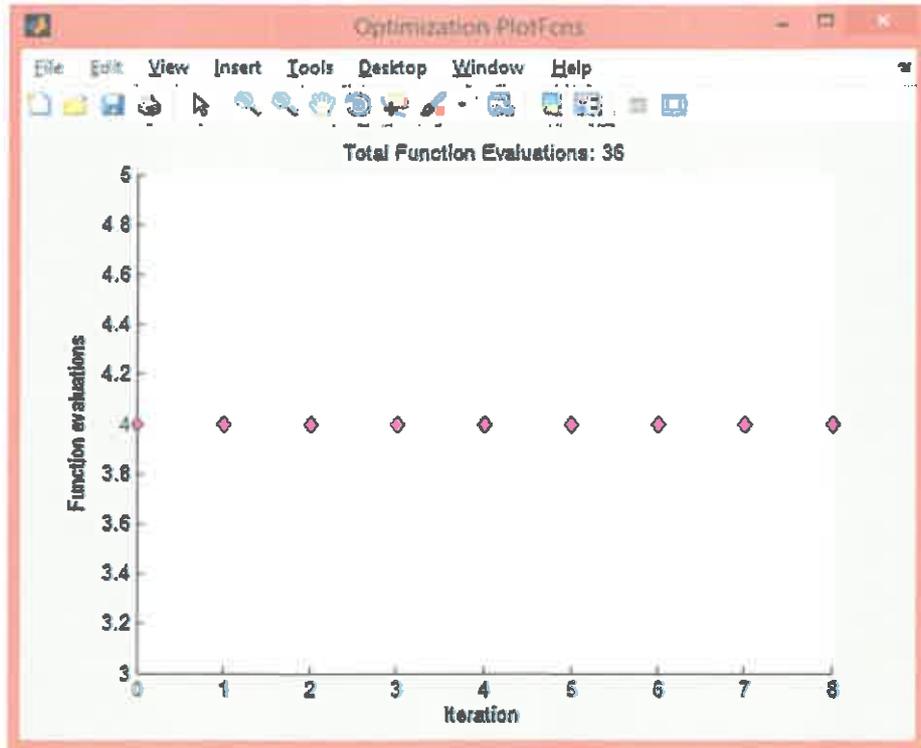


Figura 16. Salida del SQP para el contador de las funciones evaluadas.

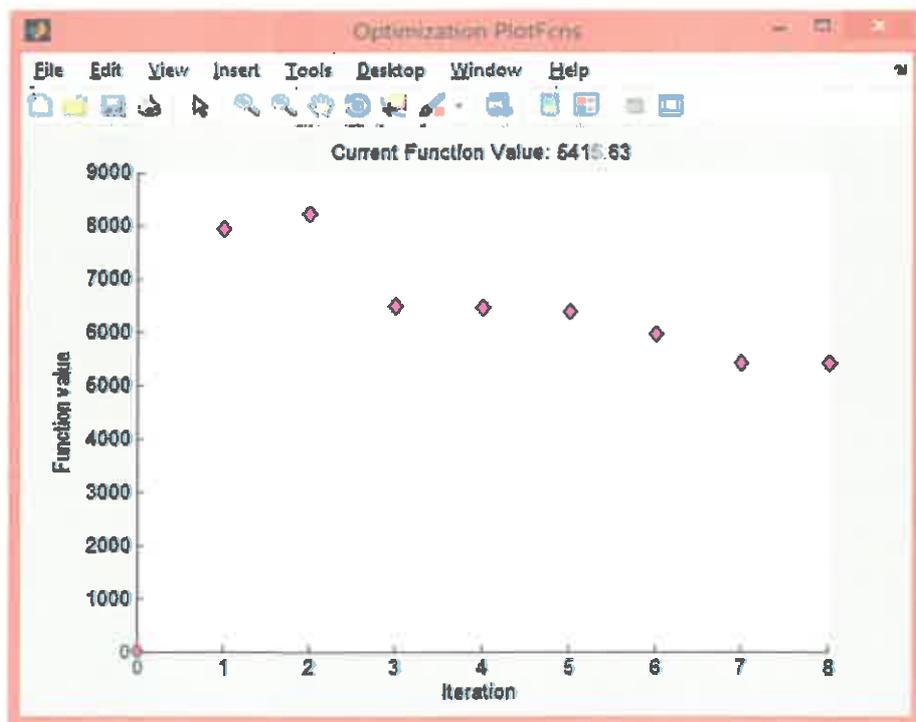


Figura 17. Variación de la función objetivo en cada iteración.

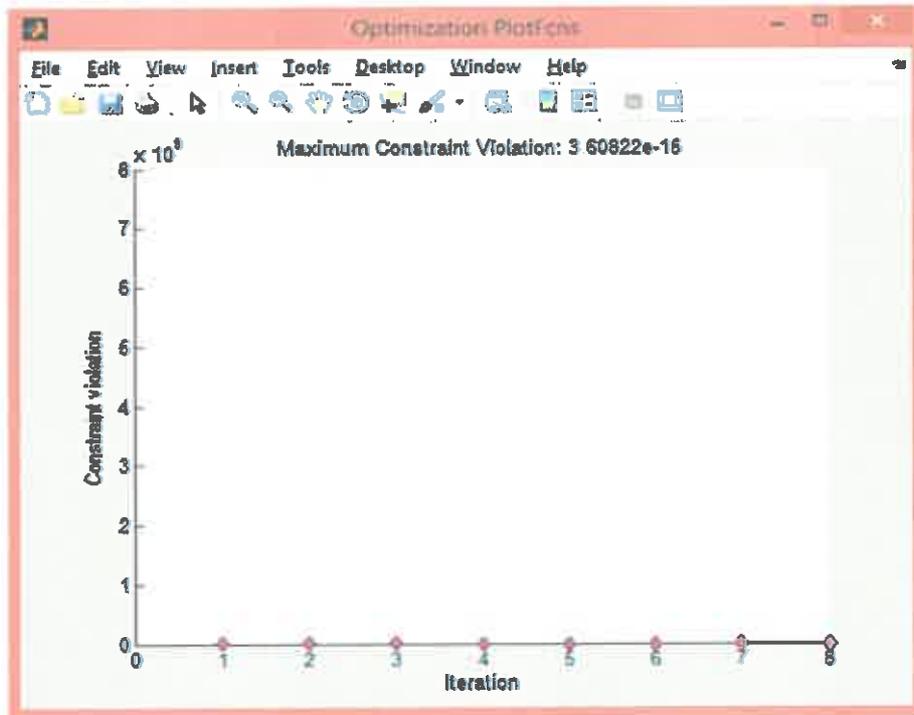


Figura 18. Máximos valores de violación de las restricciones.

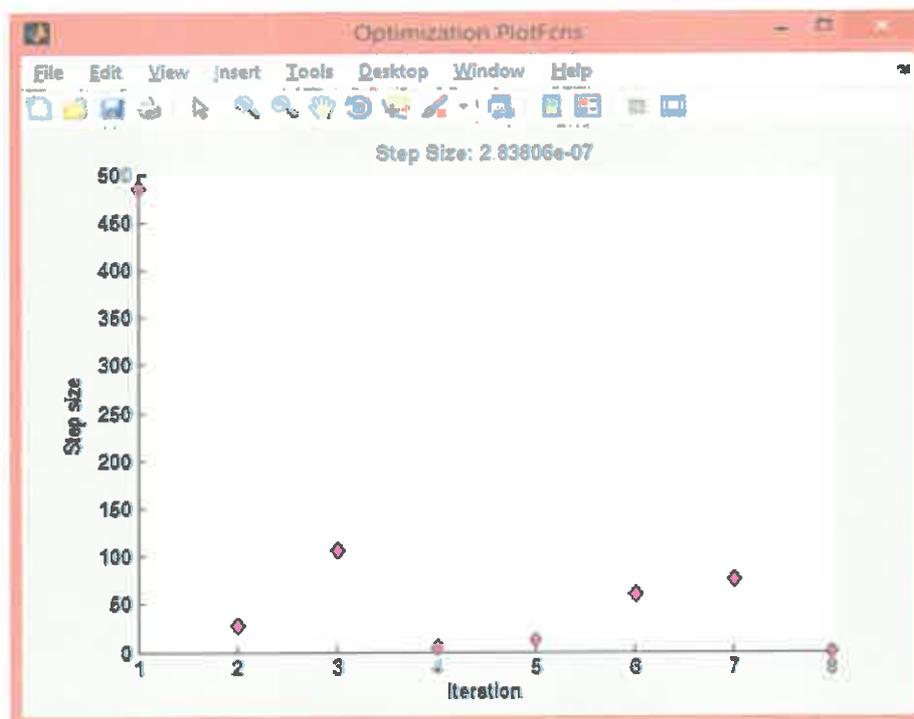


Figura 19. Medida del error en cada paso por iteración.

Para un primer cálculo y referencia de tendencia de las variables de diseño se pudo observar los resultados de las variables: $b=127.186$ cm, $h=254.372$ cm y $As=161.76$ cm.

Por razones de procedimiento constructivo y además por ser un tanto conservadores con el diseño se toma en cuenta fijar la variable de diseño "b" en 150 cm, para la posterior corrida de resultados se obtuvo:

Estación	VIGA ARCO (TECNICA SQP)							
	1	3	6	9	12	15	18	21
Parámetro								
Pu (Kgf)	1.55E+06	1.49E+06	1.35E+06	1.31E+06	1.23E+06	1.21E+06	1.17E+06	1.16E+06
Mu (Kgf-cm)	1.86E+08	1.13E+08	3.26E+07	1.92E+07	5.62E+07	2.43E+07	4.06E+07	1.91E+07
b (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
h (cm)	254.375	229.069	193.549	155.835	115.171	77.255	93.866	69.674
As=A's (cm ²)	190.781	171.802	145.162	116.876	86.378	57.941	70.4	52.255
ρ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
a (cm)	66.714	64.204	58.075	56.423	52.981	52.293	50.259	50.2
c (cm)	78.487	75.534	68.323	66.38	62.33	61.521	59.128	59.059
ϕ	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
ϕ Pn (kgf)	5.51E+06	4.96E+06	4.19E+06	3.37E+06	2.49E+06	1.67E+06	2.03E+06	1.51E+06
ϕ Mn (kgf-cm)	2.70E+08	2.23E+08	1.62E+08	1.10E+08	6.19E+07	2.50E+07	4.06E+07	1.91E+07
δb	1.0324	1.0346	1.0361	1.0433	1.0574	1.0857	1.0107	1.0029
DCO (S./m)	5970.069	5444.36	4706.43	3922.93	3078.14	2290.44	2635.54	2132.96
Nº iteraciones	9	8	8	7	6	9	104	59

Tabla 12. Salida de los resultados para un diseño con SQP

Se aprecia (tabla 12) que para las estaciones 18 y 21 tenemos 104 y 59 iteraciones, por esta razón se tomó en cuenta incrementar el parámetro del FunEvals a: 2000 y 900 ya que por defecto estas son de $100 \times N^\circ$ de variables, con esto se obtuvo $options.MaxFunEvals = 1619$ y 753 respectivamente, también el mensaje de salida que corrobora esto es: "Solver stopped prematurely; fmincon stopped because it exceeded the function evaluation limit, $options.MaxFunEvals = 300$ (the default value)".

4.1.6. CORRECCIÓN Y ECUACIÓN DE TENDENCIA PARA EL PERALTE

De los valores obtenidos con el SQP podemos resumirlo de la siguiente manera: se observa que los cálculos se realizaron para una cuantía mínima

(tabla 12) esto porque las solicitaciones son un tanto menores para nuestra viga en mención y por tanto se tomó en cuenta dicho parámetro.

Se buscaron varias ecuaciones de tendencia para conseguir una ecuación que más se ajuste a la envolvente para la variable "h", pero lo que se hizo fue combinar 02 tendencias hasta una determinada estación para una vez fusionadas estos valores se obtuviera una sola tendencia.

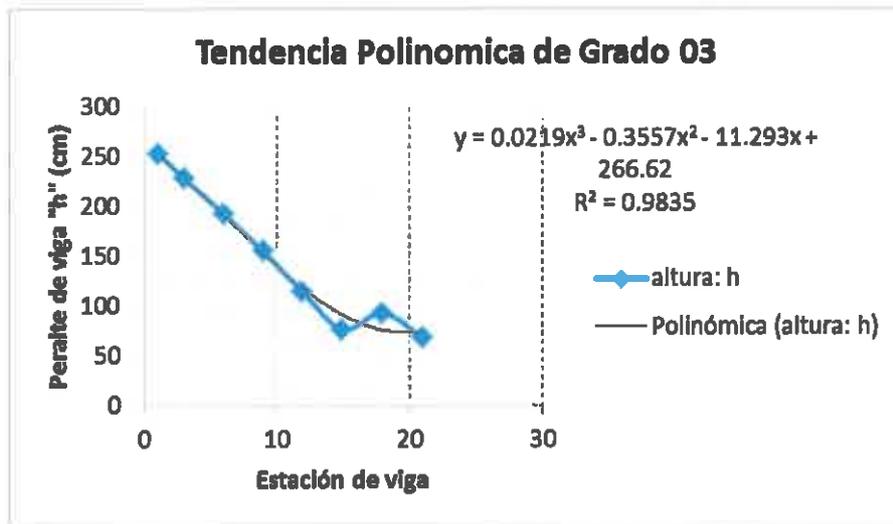


Figura 20. Ecuación para la tendencia Polinómica de 3er grado.

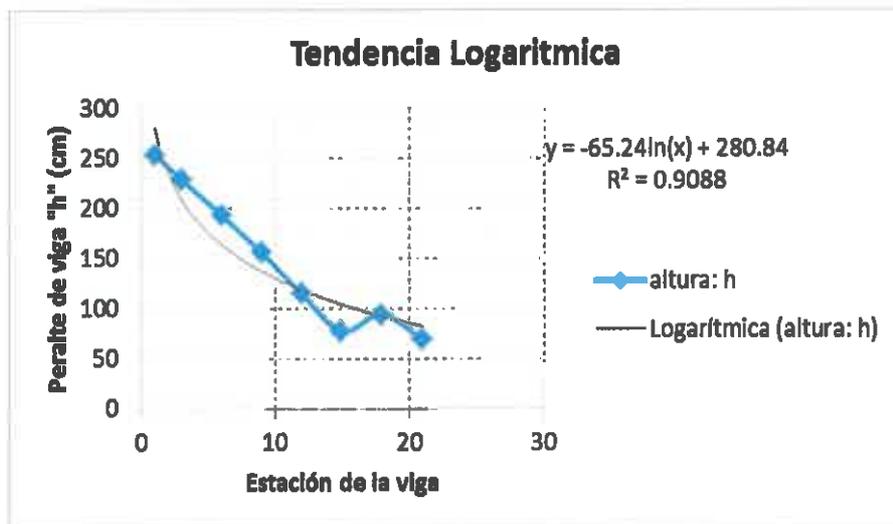


Figura 21. Ecuación para la tendencia logarítmica.

Con estos valores verificamos que tenemos dos aproximaciones, uno hasta la estación 9 con una tendencia polinómica de tercer grado y otra a partir de la estación 12 con una tendencia logarítmica, se debe tener en cuenta que estas tendencias deben de ser envolventes para el diseño de final.

Estación	VIGA ARCO (PERALTES CON TENDENCIAS ENVOLVENTES O MAYORES)							
	1	3	6	9	12	15	18	21
b (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
h (cm)	254.99	230.13	190.79	152.14	118.72	104.17	92.27	82.27
As=A's (cm2)	191.24	172.60	143.09	114.10	89.04	78.13	69.20	61.66
DCO (S/. /m)	5982.92	5466.41	4649.06	3846.10	3151.98	2849.54	2602.43	2393.50
Ahorro	33%	19%	18%	26%	42%	47%	52%	59%

Tabla 13. Valores de resumen para ecuaciones de tendencia:

Para la variable de diseño "b" se mantuvo fija en el SQP por procedimientos constructivos, la variable "h" es corregida con una ecuación de envolvente y finalmente la variable "As" depende de las anteriores por ser un valor que depende de la cuantía mínima.

Finalmente se redondearon los valores de diseño como son la variable "h" y como también para la variable "As" para un determinado número de varillas de Φ 1 3/8" que tiene un área de acero de 9.58 cm².

Estación	VIGA ARCO (VALORES REDONDEADOS PARA EL ACERO)							
	1	3	6	9	12	15	18	21
b (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
h (cm)	260	235	195	155	120	110	105	100
As=A's (cm2)	201.18	182.02	153.28	124.54	95.8	86.22	86.22	76.64
Nº fe 1 3/8"	21	19	16	13	10	9	9	8
DCO (S/. /m)	6130.98	5608.69	4786.68	3964.68	3219.81	2997.24	2920.09	2774.66
Ahorro	30%	16%	14%	23%	39%	39%	36%	37%

Tabla 14. Valores finales de diseño para una viga en arco de concreto armado

La ecuación de regresión final más cercano a estos valores es la combinación de las dos mencionadas anteriormente con una ecuación de

cuarto grado para el peralte "h", esta ecuación reemplazara a la fórmula de "arcos primarios".

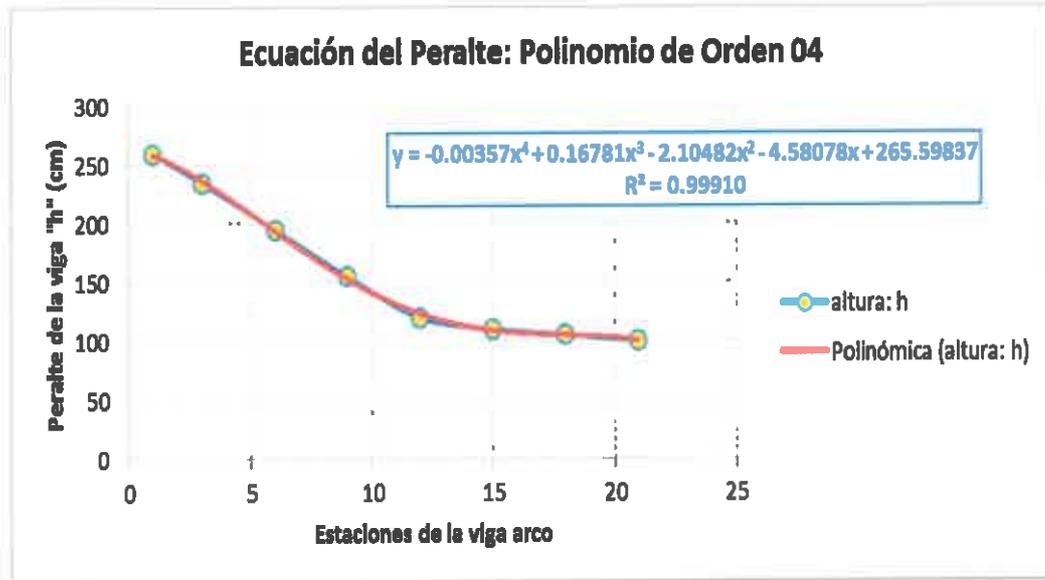


Figura 22. Ecuación para el peralte de viga en arco de concreto armado.

Luego para el posterior ingreso y verificación de los valores de desplazamientos con el programa SAP-2000 para cada estación tenemos finalmente:

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS GEOMETRICOS (PERALTE "h" = ECUACION DE 4TO GRADO)

$$e = -0.00357x^4 + 0.16781x^3 - 2.10482x^2 + 4.58078x + 265.59837$$

Luz de diseño = 74.00

Clave de arco: eo = 1.00

Arranque ϵ 2.6

Flecha = 14.80

Constante de arco: K = 0.07

n = f/L 0.2

ESTAC.	COORDENADAS		ANGULO INCLINADO		ESPESOR	COORD. INTRADOS		COORD. EXTRADOS	
	X	Y	ψ	grad	e (m)	X	Y	X	Y
1	0.00	0.000	0.675	38.66	2.60	0.812	-1.015	-0.812	1.015
2	1.85	1.443	0.650	37.23	2.49	2.604	0.451	1.096	2.435
3	3.70	2.812	0.624	35.75	2.37	4.393	1.850	3.007	3.774
4	5.55	4.107	0.597	34.22	2.23	6.178	3.183	4.922	5.031
5	7.40	5.328	0.569	32.62	2.09	7.963	4.449	6.837	6.207
6	9.25	6.475	0.540	30.96	1.94	9.749	5.643	8.751	7.307
7	11.10	7.548	0.510	29.25	1.79	11.538	6.765	10.662	8.331
8	12.95	8.547	0.480	27.47	1.66	13.332	7.813	12.568	9.281
9	14.80	9.472	0.448	25.64	1.53	15.131	8.783	14.469	10.161
10	16.65	10.323	0.415	23.75	1.41	16.935	9.676	16.365	10.970
11	18.50	11.100	0.381	21.80	1.32	18.744	10.489	18.256	11.711
12	20.35	11.803	0.346	19.80	1.23	20.559	11.222	20.141	12.384
13	22.20	12.432	0.310	17.74	1.17	22.378	11.875	22.022	12.989
14	24.05	12.987	0.273	15.64	1.12	24.201	12.447	23.899	13.527
15	25.90	13.468	0.236	13.50	1.09	26.027	12.938	25.773	13.998
16	27.75	13.875	0.197	11.31	1.07	27.855	13.351	27.645	14.399
17	29.60	14.208	0.159	9.09	1.06	29.684	13.686	29.516	14.730
18	31.45	14.467	0.119	6.84	1.05	31.513	13.945	31.387	14.989
19	33.30	14.652	0.080	4.57	1.04	33.342	14.131	33.258	15.173
20	35.15	14.763	0.040	2.29	1.03	35.171	14.247	35.129	15.279
21	37.00	14.800	0.000	0.00	1.01	37.000	14.295	37.000	15.305

Tabla 15. Valores finales para el peralte "e" de la viga arco.

4.1.7. VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

De acuerdo a la norma AASHTO LRFD – 2012 los requerimientos mínimos para el desplazamiento vertical el cual se ajusta al tipo de material es el siguiente:

Para construcciones de acero, aluminio y/u hormigón se pueden considerar los siguientes límites de deflexión. ⁽²³⁾

Carga vehicular, general	Longitud/800
Cargas vehiculares y/o peatonales	Longitud/1000
Carga vehicular sobre voladizos	Longitud/300
Cargas vehiculares y/o peatonales sobre voladizos	Longitud/375

Tabla 16. Tabla para límites de deflexión y/o desplazamientos verticales.

Tomados en cuenta la luz total de la Viga Tipo Arco de Concreto Armado que es de 74 m entonces para el tipo de Cargas Vehiculares y/o peatonales tenemos: $74/1000=0.074$ metros los cuales serán constatados y verificados para el cumplimiento de la norma.

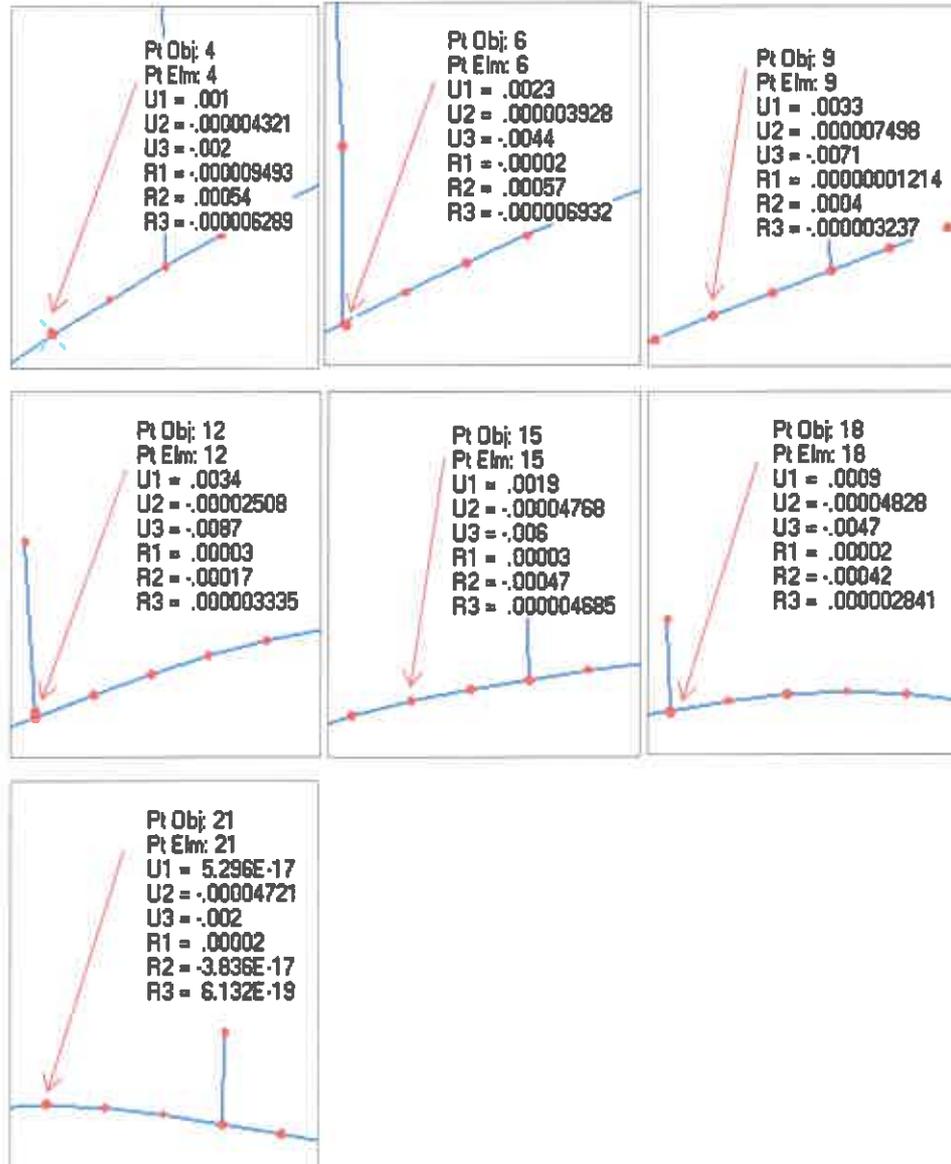


Figura 23. Desplazamientos verticales con el programa SAP2000 para la viga tipo arco según los requerimientos de RESISTENCIA I del LRFD-2012

Podemos observar que para la estación 12 (figura 23) tenemos un desplazamiento de 8.7 mm que está ubicado a una distancia relativa de $L/4$ del arco, otra estación que se encuentra con un desplazamiento

considerable es la 09 que es de 7.1 mm ubicado a una distancia relativa de $L/5$, finalmente podemos mencionar que para la estación 21 tenemos un desplazamiento de 2.00 mm ubicado en el centro del claro a $L/2$; se pudo observar que estos son valores bastante pequeños para las exigencias de la viga ya que de acuerdo a la norma tenemos como máxima restricción de 74 mm para el desplazamiento vertical de los cuales podemos afirmar que son permisibles para el diseño de la viga en arco del puente de concreto armado.

4.1.8. RESULTADOS DEL COSTO DE LA VIGA ARCO

a. DEL ESTRIBAMIENTO DE LA SECCIÓN Y ACERO LATERAL

De acuerdo a la norma se verificó que la sección de diseño no necesita estribos, pero por cuestiones de proceso constructivo se tomó acero Φ 1/2" y un recubrimiento de 4 cm también se consideró un refuerzo lateral de 06 Φ 1 3/8" en cada lado lateral de la viga.

Para determinar costo totalizado se tomó en cuenta la sumatoria del costo del estribamiento, más el costo de refuerzo lateral de la viga y finalmente más el costo mismo del diseño (tabla 17).

ESTACION	COORDENADAS		BASE "b" (m)	PERALTE "h" (m)	ACERO As (cm2)	COSTO (S/. /ml)	Estr.+ fe Lat. (S/. /ml)	PARCIAL (S/. /ml)
	X	Y						
1	0.00	0.000	150.00	260.00	201.18	6130.98	662.24	6793.22
2	1.85	1.443	150.00	249.30	201.18	5965.94	655.63	6621.57
3	3.70	2.812	150.00	237.15	182.02	5641.93	648.13	6290.07
4	5.55	4.107	150.00	223.42	182.02	5430.09	639.66	6069.74
5	7.40	5.328	150.00	208.82	182.02	5204.75	630.64	5835.39
6	9.25	6.475	150.00	193.96	153.28	4770.64	621.46	5392.11
7	11.10	7.548	150.00	179.38	153.28	4545.75	612.46	5158.21
8	12.95	8.547	150.00	165.54	153.28	4332.14	603.92	4936.06
9	14.80	9.472	150.00	152.79	124.54	3930.60	596.04	4526.65
10	16.65	10.323	150.00	141.42	124.54	3755.13	589.02	4344.15
11	18.50	11.100	150.00	131.61	124.54	3603.84	582.97	4186.81
12	20.35	11.803	150.00	123.48	95.80	3273.55	577.95	3851.50
13	22.20	12.432	150.00	117.05	95.80	3174.29	573.98	3748.26
14	24.05	12.987	150.00	112.25	95.80	3100.21	571.01	3671.22
15	25.90	13.468	150.00	108.93	86.22	2980.72	568.96	3549.69
16	27.75	13.875	150.00	106.86	86.22	2948.76	567.68	3516.45
17	29.60	14.208	150.00	105.71	86.22	2931.09	566.98	3498.07
18	31.45	14.467	150.00	105.09	86.22	2921.42	566.59	3488.01
19	33.30	14.652	150.00	104.49	86.22	2912.17	566.22	3478.39
20	35.15	14.763	150.00	103.33	86.22	2894.40	565.51	3459.91
21	37.00	14.800	150.00	100.00	76.64	2774.66	563.45	3338.11

Tabla 17. Costos de diseño y estribamiento con acero de refuerzo lateral

b. DEL COSTO TOTAL DE LA VIGA EN ARCO

Para cuestiones de análisis podemos resumir para un tramo de mitad de la viga arco los metrados para: la cantidad de encofrado que es de 191.46 m², un volumen de concreto de 97.89 m³ y una cantidad de acero total 12,425.22 kg.

También se pudo estimar la cantidad de acero por m³ de concreto ejecutado (tabla 17) que es de 126.94 kg/m³ y que servirá para las demás estructuras de nuestro puente tipo arco de concreto armado cabe recalcar que esto es solo un estimado.

ESTACION	Longitud (m)	parcial (S./ml)	costo viga (S./trm)	Encofrado (m ²)	Vol. Conc. (m ³)	Acero Dise. (kg)	ESTRIBO (kg)	Acero Later. (kg)
1	2.346	6793.224	15938.40	15.720	9.150	370.530	55.498	423.463
2	2.301	6621.574	15239.21	14.927	8.606	363.459	54.169	415.382
3	2.258	6290.066	14204.31	14.098	8.033	322.666	52.517	407.579
4	2.217	6069.745	13454.23	13.230	7.429	316.721	50.650	400.069
5	2.177	5835.387	12702.00	12.356	6.818	311.022	48.663	392.870
6	2.139	5392.108	11531.84	11.504	6.222	257.333	46.643	385.999
7	2.102	5158.210	10845.13	10.697	5.657	252.983	44.660	379.474
8	2.068	4936.059	10209.56	9.950	5.136	248.875	42.777	373.313
9	2.036	4526.647	9217.82	9.277	4.667	199.081	41.044	367.534
10	2.007	4344.151	8716.74	8.685	4.256	196.168	39.497	362.156
11	1.979	4186.813	8285.99	8.178	3.907	193.481	38.163	357.196
12	1.954	3851.499	7525.85	7.757	3.619	146.947	37.058	352.673
13	1.931	3748.263	7239.61	7.419	3.391	145.251	36.183	348.603
14	1.912	3671.221	7017.57	7.159	3.218	143.751	35.530	345.003
15	1.894	3549.686	6723.96	6.968	3.095	128.207	35.078	341.886
16	1.880	3516.447	6609.97	6.837	3.013	127.225	34.797	339.267
17	1.868	3498.065	6534.53	6.752	2.962	126.434	34.641	337.158
18	1.859	3488.013	6485.01	6.696	2.931	125.838	34.556	335.567
19	1.853	3478.387	6446.59	6.653	2.905	125.438	34.474	334.502
20	1.850	3459.908	6402.11	6.600	2.868	125.238	34.318	333.968
21	0.000	3338.113	0.00	0.000	0.000	0.000	33.996	0.000
		TOTAL	191330.42	191.462	97.885	4226.650	864.911	7333.662
		ACERO TOTAL						12425.223
		ACERO kg / m³ concre						126.937

Tabla 18. Costo de la viga en arco y metrados totalizados.

El costo final que se obtuvo es de S/. 191,330.42 nuevos soles (tabla 18) en un tramo para la mitad de la viga en arco, entonces multiplicando por cuatro hace un total de S/. 765,321.68 nuevos soles, costo total para las dos vigas en arco de nuestro puente en mención.

c. CONTRASTE DEL COSTO DE LA VIGA ARCO

Se puede observar la comparación con los resultados finales (tabla 19) el cual existe una diferencia considerable en cuanto a la diferencia entre el costo con método tradicional y el método SQP "el ahorro" en función al costo tradicional.

Estación Método	VIGA ARCO: DISEÑO DE COSTO OPTIMO "DCO" (S./m)							
	1	3	6	9	12	15	18	21
TRADICIONAL	7959.66	6481.66	5463.69	4861.22	4466.50	4175.66	3967.91	3801.71
CON SQP	6130.98	5608.69	4786.68	3964.68	3219.81	2997.24	2920.09	2772.66
AHORRO	1828.68	872.97	677.01	896.54	1246.69	1178.42	1047.82	1029.05
% DE AHORRO	30%	16%	14%	23%	39%	39%	36%	37%

Tabla 19. Contraste de los costos cuantitativos y ahorro

Podemos concluir (figura 24) que nuestro método es bastante adecuado para la optimización por Diseño de Costo Óptimo (DCO), puesto que cada estación de la viga en arco (muestra representativa) siempre mantiene un ahorro por cada sección transversal.

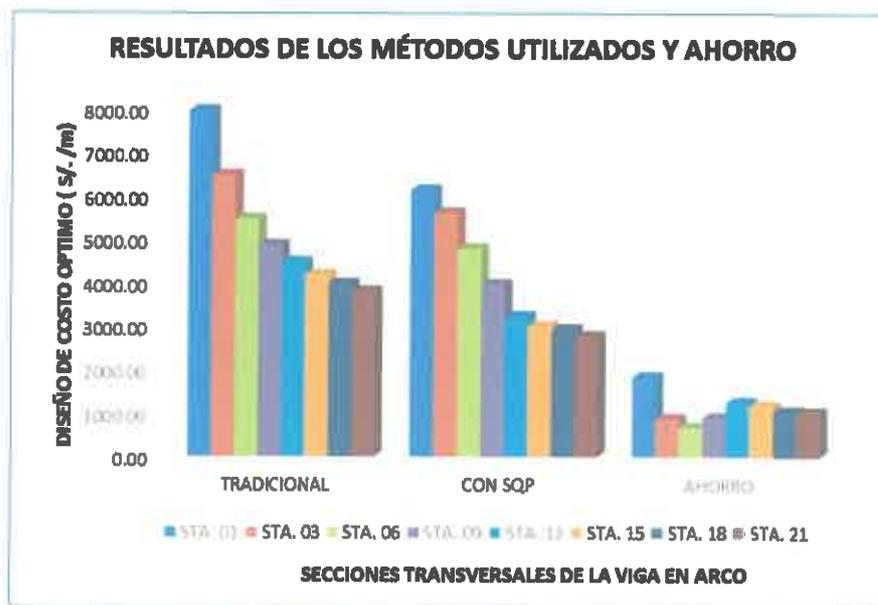


Figura 24. Contraste de resultados método tradicional VS método con SQP.

4.1.9. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Para determinar que la Técnica SQP resulta ser una metodología óptima se realizó una prueba de comparación de medias entre el Diseño Tradicional y la Técnica SQP, a partir de las siguientes hipótesis:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde μ_1 representa la media del parámetro calculado mediante el Diseño Tradicional y μ_2 representa la media del parámetro calculado a través de la Técnica SQP. A partir de esta prueba estadística se determina si ambas metodologías arrojan resultados iguales o diferentes, mostrando así que metodología resulta ser más óptima, para ello la hipótesis nula deberá rechazarse.

En la (Tabla 20) se presenta el contraste de diferencia de medias de los parámetros altura de peralte "h" (cm) y DCO (S/.). Respecto a la altura se encontró que en promedio la diferencia de medias es de 54,75 cm. \pm 16,53 cm, toda vez que la altura en cada sección varía a lo largo de la luz del puente, además se identificó que la hipótesis nula se rechaza, dado que el nivel de significancia (p-value) es menor al 5%, es decir ambas metodologías son diferentes y que la Técnica SQP resulta ser óptima en el cálculo de dimensiones, dado que la diferencia de medias resulta ser positiva. Por otro lado, el parámetro DCO indica que en promedio las medias tienen una diferencia de S/. 1 096,5 \pm S/.345,3, es decir, los costos resultan ser mayores con el Diseño Tradicional y además se identificó que la hipótesis nula se rechaza, toda vez que el nivel de significancia (p-value) es menor al 5%, determinándose una vez más la optimalidad de la Técnica SQP.

Parámetro	Media	Desv. Est.	t-stat	Intervalo		p-value
				Máx.	Mín.	
h (cm)	54,75	16,53	9,3662	68,57	40,93	0,000
DCO (S/.)	1096,5	345,27	8,9825	1385,15	807,85	0,000

Tabla 20. Prueba de diferencia de medias entre la optimización del Diseño Tradicional y la Técnica SQP

En la (Tabla 21) se encuentra un resultado relevante el cual es el porcentaje de ahorro del DCO, que genera la técnica SQP en comparación con el Diseño Tradicional, estimándose que en promedio se ahorra un 29% \pm 10% en cada estación de la viga, lo que implica una mayor eficiencia en el uso de los recursos, principalmente en el uso del acero.

Parámetro	Media	Desv. Est.
% Ahorro	29,10%	10,40%

Tabla 21. Porcentaje de Ahorro con la Técnica SQP

Adicionalmente, la (Figura 25) muestra la relación entre la sección y el porcentaje de ahorro encontrándose que existe una relación directa, es decir, a medida que se acerca a la parte central de la viga (sección 21), el porcentaje de ahorro resulta ser mayor, esto indica que el Diseño Tradicional en comparación con la Técnica SQP arroja dimensiones sobredimensionadas de los parámetros generando mayores costos. Específicamente se establece que los mayores ahorros con la Técnica SQP se obtienen en las zonas donde la altura del peralte es menor, toda vez que la altura se reduce a medida que se aproxima a la parte central de la viga arco. Adicionalmente se encontró que mediante la Técnica SQP se consiguió ahorrar en un 30% en la estación de empotramiento (sección 01), en un 23 % para la estación ubicada a L/4 del claro (sección 09) y un 37% para la estación ubicada en la clave a L/2 de la viga arco (sección 21).

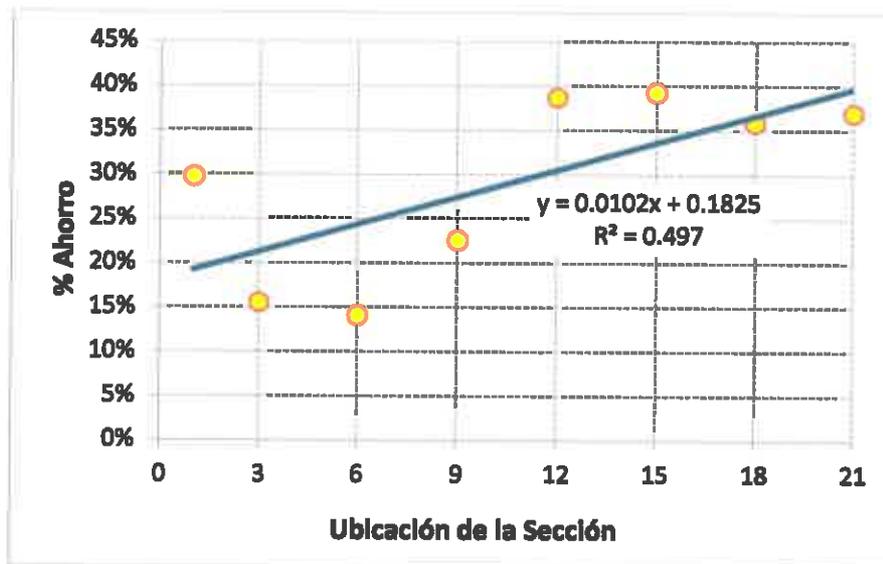


Figura 25. Relación entre la ubicación de la sección y porcentaje de ahorro

Con este parámetro justificamos el haber considerado un valor bastante conservador de 1.00 m para el peralte "h" en la clave del arco, ya que el calculado fue de 69.67 m en esta misma ubicación, pese a esta consideración la ecuación de regresión lineal muestra un ahorro significativo en la clave del arco.

4.2. DISCUSIÓN

Borda y Rodríguez en su publicación "OPTIMIZACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES DE PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE USO DE LA TÉCNICA DE PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA SECUENCIAL SQP", obtuvieron soluciones más económicas frente a diseños tradicionales en un 11.73% para vigas simplemente armadas y 31% para columnas cortas, por el cual el autor considera al Diseño de Costo Óptimo (DCO) como una alternativa técnica y económicamente viable para proyectos de edificación. ⁽⁹⁾

En el presente trabajo de investigación, de lo obtenido en los resultados finales de los costos para la viga en arco nos arroja resultados excelentes en cuestión de ahorro que en promedio es un 29.10%, con margen de error de +/- 10.40%, también

se puede observar la contrastación de costos de los dos métodos (figura 26) en el cual en cada estación de la sección transversal de la viga en arco siempre se consigue un ahorro con el método SQP y por tanto afirmamos que la Técnica de Optimización con el SQP es válido como método para el Diseño de Costo Óptimo (DCO).

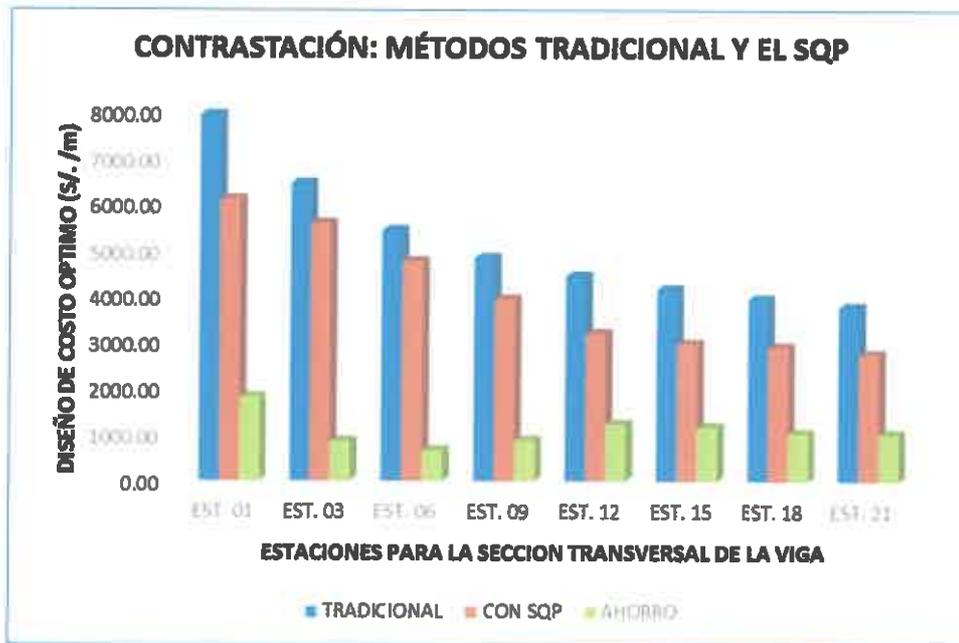


Figura 26. Contrastación de costos con el método tradicional y el SQP

Con referencia al costo total, podemos afirmar que el mismo hecho de haber escogido un tipo de puente en arco de concreto armado ya es en sí un factor significativo para el ahorro ya que este tipo de puente es considerado muy económico para luces mayores y se pudo verificar que de acuerdo al código SNIP: 256944 el proyecto: "INSTALACIÓN DEL PUENTE VEHICULAR ALBERTO BENAVIDES DE LA QUINTANA SOBRE EL RIO ICHU DEL BARRIO DE SAN CRISTÓBAL, DISTRITO DE HUANCVELICA, PROVINCIA DE HUANCVELICA – HUANCVELICA" tenemos un presupuesto total del proyecto de S/. 16'061,904.00 nuevos soles. (33)

Para reforzar la contrastación de costos del presente estudio de investigación del Puente Tipo Arco de Concreto Armado se obtuvo S/. 11'109,444.29 (Anexo 8), el cual hace una diferencia de S/. 4'952,459.71 casi un total de cinco millones de nuevos soles, y reiteramos en dar como válido a la Técnica del SQP para optimización y como también ponemos énfasis en la selección del tipo de puente escogido que fue la más adecuada en su tipología.

En cuanto al aspecto estructural y planteamiento técnico mencionamos tres factores importantes por los cuales no podemos recomendar ni tampoco plantear este tipo de alternativa que muestra el Perfil Técnico del Puente Alberto Benavides de la Quintana los cuales son: primero se plantea 04 alcantarillas MP-70 C circulares de los cuales realizando un estudio hidrológico real y concreto no será suficiente como para permitir el paso del máximo caudal del río en sus máximas avenidas para un caso concreto de diseño de un periodo de retomo de 50 años como mínimo y como también no se cumplen los gálibos mínimos de 2.50 m que la norma recomienda, segundo los muros planteados del tipo Macwall no son adecuados para utilizar en alturas considerables ya que en nuestro puente en mención hace un total de 46.30 metros, podemos apreciar la falla de este tipo de muro utilizado en el Puente del Jr. Cuzco (Anexo 9) y finalmente como tercer punto el tipo de relleno no es pues el adecuado a pesar del uso de geomallas distribuidas a distancias de acuerdo a las especificaciones técnicas, no son pues técnicamente adecuados porque no contrarrestan el empuje por parte del relleno estructural utilizado en este puente. Por lo mencionado podemos resumir que el tipo de puente tipo alcantarilla abovedada con muros Macwall y rellenos estructurales con geomallas, no es pues una solución técnicamente recomendable ni adecuada y como también concluimos que este tipo de planteamiento estructural del todo no es funcional.

CONCLUSIONES

1. Muchos autores en optimización estructural señalan que a la fecha los diseños estructurales son incompletos a causa de que dichos diseños son un resultado en el que sólo se considera el aspecto de resistencia, no tomándose en cuenta el factor económico el cual ocasiona diseños costosos en nuestra región de Huancavelica.
2. El método SQP es una herramienta adecuada para resolver problemas de optimización no lineal restringida, esta también se aplica a diseños existentes como también para predimensionamientos de proyectos en desarrollo, el cual ayudarán a verificar que las estructuras no estén sobredimensionadas. Por tanto el Diseño de Costo Óptimo DCO se puede considerar como una alternativa técnica y económicamente viable para conseguir diseños bastante confiables y también cabe mencionar que esta técnica aportará considerablemente en diseños futuros.
3. La técnica SQP planteada no solo se aplica también a diseños ya existentes sino que puede plantearse para realizar predimensionamientos de estructuras en desarrollo el cual ayuda a verificar que estas estructuras no estén sobredimensionadas, y como también para muchos tipos de problemas de optimización en proyectos de ingeniería en general.
4. Se pudo obtener soluciones mucho más económicas en referencia a diseños tradicionales de la viga en arco: en un 30% para la estación 01 de empotramiento, en un 23 % para la estación 09 ubicado a $L/4$ y un 37% para la estación 21 clave del arco a $L/2$ centro del claro, por tanto se puede considerar al Diseño de Costo Óptimo (DCO) como una alternativa técnica y económicamente viable para proyectos de puentes.

RECOMENDACIONES

1. Es recomendable el uso de programas como el SAP2000 y el CSI BRIDGE para el modelamiento matemático y reporte de resultados para las distintas solicitaciones de carga en la mayoría de los tipos de puentes ya que estos programas reflejaran los resultados de una manera muchísimo más próxima a la realidad y no utilizar métodos aproximados como es el caso del Método de Invariantes el cual es muy usado en el diseño de puentes en arco.
2. Para el caso vigas en arco de luces muy grandes es recomendable contar con un número mayor de vigas diafragma para el arco conjuntamente con las columnas de transmisión de carga que en cierta medida acortan los tramos para el diseño, y además que la restricción de esbeltez g_6 no sea la más dominante en el diseño puesto que esta restricción genera secciones mucho más grandes en referencia a la restricción de resistencia g_1 y g_2 .
3. Se recomienda el uso de la técnica SQP para la solución de muchos tipos de problemas de optimización los cuales pueden ser: muros de sostenimiento, edificaciones, redes de sistemas de tuberías de agua y alcantarillado, canales de irrigación, entre otros. Es recomendable para cada tipo de problema revisar la normatividad vigente puesto que es imprescindible la implementación del SQP en función a cada tema para la resolución de los problemas arriba citados.
4. Existen amplia bibliografía del tema del SQP hecha en inglés, pero se recomienda para un mejor entendimiento y comprensión del tema de Optimización con SQP el traducir los libros citados en inglés puesto que son los que mejor explican del tema.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Torroja Miret E. Razón y ser de los Tipos Estructurales. Reedición moderna ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; 1991.
2. Lozano D, Velásquez F, Zepeda A. Optimización Estructural de Forma en el Diseño de Cavidades en Elementos Planos Mediante Algoritmos Evolutivos; 2010.
3. Mollo M. Puente en Arco con Tablero Inferior con Péndolas de Cables Sobre el Río San Juan del Oro Bolivia; 2008.
4. Lapadula Sequera VA. Estudio comparativo sobre la aplicación de los algoritmos PSO y SQP en la optimización de pórticos planos de concreto armado Ingeniería Fd, editor. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana; 2014.
5. Seminario Manrique E. Guía para el Diseño de Puentes Piura: Repositorio Institucional PIRHUA; 2004.
6. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Diseño de Puentes 589-2003-MTC/02 RMN, editor. Lima: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles; 2003.
7. Demchenko Y. Sistemas de Construcción de Puentes Arcos Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2011.
8. Coello Coello CA, Santos Hernández F, Alonso Farrera FA. Diseño Óptimo de Vigas de Concreto Reforzado Mediante Algoritmos Genéticos México: Universidad Autónoma de Chiapas México; 2007.
9. Borda Flores JL, Rodriguez G. Optimización de Secciones Transversales de Pórticos de Hormigón Armado Mediante uso de la Técnica de Programación Cuadrática Secuencial SQP. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. 2010 Noviembre; XXIX.
10. Hennings Marianyi E. Puente en Arco Tipo Network. Memoria de Cálculo y Planos. Cuzco; 2006.
11. Romani Loayza SJ. Optimización de Estructuras Aperticadas de Concreto Armado UNI Idi, editor. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería; 2004.
12. X H, Y M X. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures Wiley J, Sons L, editors. New Delhi: Times by Aptara Inc.; 2010.
13. Hojjat A, Kalmal C S. Cost Optimization of Structures Wiley J, Sons L, editors. Pondicherry: Times by Integra Software Services Pvt. Ltd.; 2006.

14. Sánchez Caballero S. Optimización Estructural y Topológica de Estructuras Morfológicamente no Definidas Mediante Algoritmos Genéticos Valencia: Universitat Politècnica de Valencia; 2012.
15. Pérez Marqués M. Técnicas de Optimización con Matlab Middletown, DE: MathWorks; 2014.
16. Celorrio Barragué L. Metodología Eficiente de Optimización de Diseño Basada en Fiabilidad Aplicada a Estructuras Rioja Udl, editor. Logroño: Publicaciones.unirioja.es; 2013.
17. MathWorks Inc. Optimization Toolbox User's Guide EE. UU.: MathWorks Inc.; 2013.
18. Mestas MD. Optimización Estructural Evolutiva: Desarrollo de una Aplicación de Computo para el Diseño Óptimo de Elementos Bajo Deformación Plana Coyoacán: Universidad Nacional Autónoma de México; 2010.
19. McCormac JC, H. Brown R. Diseño de Concreto Reforzado. 8th ed. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor S.A.; 2011.
20. Comité 318-S. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11) Michigan: American Concrete Institute; 2011.
21. Aranís García-Rossell C. Análisis y Diseño de Puentes de Concreto Armado Lima: Capítulo de Estudiantes de la Universidad Nacional de Ingeniería; 2006.
22. Empresa Editora Macro E.I.R.L. Manual de Diseño de Puentes Lima: Macro E.I.R.L.; 2010.
23. AASHTO. AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS Washington. DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2012.
24. Instituto de la Construcción y Gerencia. Análisis, Diseño y Construcción de Puentes. 2nd ed. Lima: Fondo Editorial ICG; 2008.
25. Leet KM, Uang CM. Fundamentos de Análisis Estructural. 2nd ed. México: Mc Graw Hill; 2002.
26. Leontovich V. Pórticos y Arcos. 4th ed. Barcelona: Compañía Editorial Continental S. A.; 1970.
27. Riveros Jorge E. Puente Carrozable Ucañan. Memoria de cálculo. Huancavelica: CARITAS - HVCA., Huancavelica; 2001.
28. Morales R. Diseño en Concreto Armado. 3rd ed. ICG , editor. Lima: Instituto de la

Construcción y Gerencia; 2006.

- 29. Harmsen E. T. Diseño de Estructuras de Concreto Armado. 4th ed. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú; 2005.**
- 30. Ministerio de Vivienda. Reglamento Nacional de Edificaciones Lima: El Peruano; 2006.**
- 31. HOB Consultores S. A. Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Huancavelica - Lircay, Tramo Km 1+550 (Av. Los Chancas) - Lircay. Expediente Técnico. Huancavelica: Ministerio de Transportes y Comunicaciones; 2013.**
- 32. Cámara Peruana de la Construcción. Costos y Presupuestos en Edificación. 29th ed. Ramos Salazar J, editor. Lima: Capeco; 2013.**
- 33. OPI Municipalidad Provincial de Huancavelica. Instalación del Puente Vehicular Alberto Benavides de la Quintana Sobre el Río Ichu, en el Barrio de San Cristóbal, Distrito de Huancavelica, Provincia de Huancavelica - Huancavelica. Código SNIP 256944. Huancavelica: Sistema Nacional de Inversión Pública; 2013.**

ARTÍCULO CIENTÍFICO

TÉCNICA DE PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA SECUENCIAL (SQP) PARA OBTENER LA OPTIMIZACIÓN DE VIGAS PRINCIPALES DE PUENTES TIPO ARCO DE CONCRETO ARMADO

Bach./Ing. Civil: Leopoldo Adolfo FELIPE INCA

1 RESUMEN

En estos años de avance computacional y tecnológico se ha visto una mejora extraordinaria de una rama de la ingeniería llamada "optimización estructural" para la resolución de los problemas de diseño estructural de los cuales se plantean plataformas en base a una o varias funciones objetivo. Del mismo modo en estos últimos años, para realizar un diseño estructural hacia falta de mucha pericia por parte del ingeniero proyectista y como también le demandaba mucho tiempo en el diseño en mayor parte en los ciclos del proceso iterativo del cálculo.

En lo referente a la optimización estructural se plantea una metodología para realizar un Diseño de Costo Óptimo (DCO) para vigas principales de un puente tipo arco de concreto armado con respecto a las solicitaciones de carga requeridas y de acuerdo con la normatividad del ACI 318S-11 y del AASHTO LRFD-2012, todo ello mediante el uso de la minimización matemática de la función objetivo del costo de nuestra estructura, esta función comprende la suma de los costos reales de las partidas de concreto, el acero estructural, el encofrado y desencofrado incluido los costos de mano de obra para dichas partidas.

El programa MATLAB R2013a cuenta con muchos algoritmos ya desarrollados y resueltos como es para el caso de la optimización, dentro de sus librerías de "Optimization Toolbox" se tiene acceso a muchas técnicas de programación lineal y no lineal, de los cuales en nuestro caso particular se utilizó la minimización matemática con la función "fmincon" y por consiguiente el método de resolución es el algoritmo de Conjunto Activo (Active Set) o método de Programación Cuadrática Secuencial (SQP). Para la obtención del DCO de nuestro problema en particular, se realizó mediante la -

estructuración e implementación de la técnica de SQP, también se hizo una contrastación para la verificación de los resultados en referencia a un diseño tradicional.

El problema que se logró solucionar aplicando la técnica del SQP y como ejemplo fue el proyecto denominado "Instalación del Puente Vehicular Alberto Benavides de la Quintana Sobre el Rio Ichu del Barrio de San Cristóbal, Distrito de Huancavelica, Provincia de Huancavelica - Huancavelica" (Puente Integración), donde se pudo apreciar en comparación a un diseño tradicional los ahorros significativos del costo para la viga principal en arco que fueron: en un 30% para el arranque de la viga, un 23% a L/4 de la viga y un 37% en la clave del mismo, finalmente obteniendo un ahorro promedio del 29% con un margen de error de +/- 10% en cada estación de la viga; por tanto se concluye que el DCO es una metodología económicamente viable para cualquier tipo de diseño estructural u obra civil en general.

2 INTRODUCCIÓN

Anteriormente para realizar diseños de elementos estructurales el proyectista requería de mucha experiencia para realizar tanto el diseño inicial (predimensionamiento) y análisis de acuerdo a las leyes físicas, todo esto tomando en cuenta si el diseño es válido de acuerdo a la normatividad y solicitaciones estructurales para finalmente obtener un diseño final.

Con la utilización de herramientas como la Programación Cuadrática Secuencial (SQP) algoritmos de minimización matemática no lineal, podemos obtener eficientemente diseños óptimos en cuanto a estructura y costo, gracias a los procesos iterativos que el computador

determina en función a las solicitaciones de la estructura.

En la actualidad encontrar el punto de equilibrio entre la seguridad máxima y costo mínimo, ya no son contradictorios puesto que con la búsqueda de funciones mínimas múltiples con restricciones hacen que estas se solucionen gracias al computador, permitiendo así al diseñador tomar más tiempo en los modelos estructurales y mas no así en el cálculo iterativo de estas.

3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento de optimización ha sido adaptado de J. Borda Flores y G. Rodríguez y pasa por las siguientes etapas:

1.- A partir de los requerimientos y las solicitaciones de carga, se procede a obtener los resultados por predimensionado o por diseño tradicional, de acuerdo a las recomendaciones que provee el reglamento ACI 318-11 y la Norma LRFD-2012.

2.- Determinar las solicitaciones internas en cada elemento como pueden ser: fuerzas axiales y momentos flectores; mediante métodos tradicionales, por elementos finitos (FEM), métodos matriciales; que están disponibles en programas computacionales comerciales como el SAP 2000, CSI BRIDGE, etc.

3.- Construcción de la función objetivo y restricciones de acuerdo al planteamiento hecho a partir de los datos del problema.

4.- Resolución del problema de optimización para encontrar una solución global o por lo menos un mínimo local, empleando la técnica de programación cuadrática secuencial (SQP) con el Optimtool del Matlab R2013a.

5.- Ensayar sobre la solución obtenida (óptima) un criterio de detención del procedimiento hasta que se cumpla con un valor de tolerancia para la función objetivo y restricciones, como también un sinceramiento y corrección para la validación de los datos obtenidos.

6.- Corroborar el comportamiento estructural final del puente en arco de acuerdo a los requerimientos y exigencias de la Norma LRFD-2012.

7.- Finalmente calcular el costo total de la viga y el puente tipo arco de concreto armado, con la ayuda de los planos elaborados en Civil3D y hojas de cálculo para metrados y presupuesto.

4 METODOLOGÍA

Gran parte de la metodología de diseño en estructuras para concreto armado están regidos de acuerdo a la norma ACI 318S-11, establecidos para elementos sometidos a esfuerzos de flexo compresión, una combinación de elementos sometidos a flexión y a compresión, también este reglamento sirve como fundamento principal para la norma LRFD-14 para el diseño de puentes de concreto armado y acero estructural.

Se permite ignorar los efectos de esbeltez en los siguientes casos:

a. Elementos sometidos a compresión no arriostrados contra desplazamientos laterales cuando:

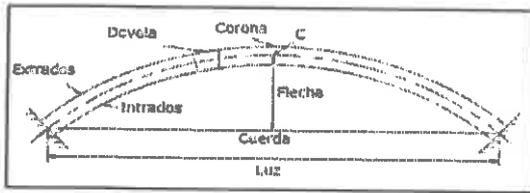
$$\frac{K Lu}{r} \leq 22$$

b. En elementos a compresión arriostrados contra desplazamientos laterales cuando:

$$\frac{K Lu}{r} \leq 34 - 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \leq 40$$

Una parte de la metodología de los métodos aproximados para la Amplificación de Momentos Vigas-Columna se menciona en el reglamento LRFD-2012. Art. 4.5.3.2.2a.

Existen factores para la magnificación de momentos – arcos en el reglamento del LRFD-2012 el cual se detallan específicamente como también el factor K para longitud efectiva de nervaduras de arco, estas están en función de la relación flecha del arco y la longitud o luz libre.



Elementos principales de una viga arco.

Las coordenadas de los ejes del arco parabólico son:

$$y = 4f \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{x}{L}$$

El ángulo de inclinación del eje del arco para puntos que no sean los tabulados puede hallarse mediante la ecuación:

$$\tan \varphi = \frac{4f}{L} \left(1 - \frac{2x}{L}\right)$$

Un arco primario puede ser definido como un arco cuyas mitades son simples prismoides de ancho constante, deformados a la curva del arco. Sus secciones varían más o menos uniforme desde la corona hasta el estribo, variando el momento de inercia de la sección de acuerdo con la ecuación lineal:

$$I = \frac{I_0}{\cos \varphi \left[1 - (1 - k) \frac{2y}{L}\right]}$$

La constante del arco, definida por la ecuación:

$$k = \frac{I_0}{I_a \cos \varphi_a}$$

Para proporcionar una solución inicial, se puede hacer un predimensionado rápido para la clave del arco usando la relación empírica propuesta por Elías Riveros:

$$hc = \left[\frac{110.53}{f_c} \left(4.597\sqrt{L} + 0.833L + \frac{WD}{0.942} + \frac{WL}{0.384} \right) \right] + 5$$

Una vez determinado la clave del arco se puede estimar el arranque del arco con:

$$e_a = 2.34 \cdot e_c$$

Como también la base de la viga se estima con:

$$b = \sqrt{S'} \cdot L \cdot 0.0106$$

El estado límite de diseño LRFD:

$$n_i \Sigma \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r$$

Los modificadores de carga son:

$$n_i = n_D n_R n_I \geq 0.95$$

Carga para resistencia última

$$U = n_i [\gamma_{PDC} Q_{PDC} + \gamma_{PDW} Q_{PDW} + \gamma_{LL+IM} Q_{LL+IM}]$$

AMPLIFICACIÓN DE MOMENTOS:

Método aproximado para amplificación de momentos:

$$M_c = \delta_b \cdot M_{2b} + \delta_s \cdot M_{2s}$$

$$f_c = \delta_b \cdot f_{2b} + \delta_s \cdot f_{2s}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi \cdot P_e}} \geq 1.00$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma P_u}{\phi \cdot \Sigma P_e}}$$

Para la Carga de Pandeo de Euler:

$$P_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot Lu)^2}$$

Valores de K para longitud efectiva de arco

Relacion	Arco	Arco	Arco Fijo
Flecha/Longitud	Trigarticulado	Biarticulado	
0.1-0.2	1.16	1.04	0.70
0.2-0.3	1.13	1.10	0.70
0.3-0.4	1.10	1.10	0.70

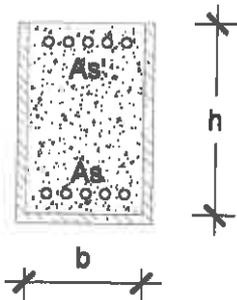
5 IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DEL SQP

La función objetivo para la búsqueda de función mínima de la viga en arco de concreto armado por metro lineal se expresa con 03 variables de

diseño: la base b , la altura total h , el área de acero en tracción A_s y que es igual al de compresión A_s' para este caso.

$$\min F = C_c b h + 2 C_s A_s + C_f (b + 2h)$$

Se tomó en cuenta las variables de diseño como son la base b , la altura total h y el área de acero como ya se mencionó:



Donde:

$$b = x(1)$$

$$h = x(2)$$

$$A_s = A_s' = x(3)$$

ECUACIONES DE RESTRICCIÓN Y BORDE

La carga axial última P_u no debe tomarse mayor que la resistencia axial de diseño máxima ϕP_n max. Para elementos no preesforzados con estribos dispuesta en el ACI 318-11 Art. 10.3.6.2:

$$g_1 = 1.36 \phi f'_c A_s - 1.60 \phi f_y A_s - 0.68 \phi f'_c b h + P_u \leq 0$$

Restricción por flexión uniaxial:

$$g_2 = 0.425 \phi f'_c a^2 b - 0.425 \phi f'_c a b h + 2 \phi d' f_y A_s - \phi f_y h A_s + M_u \leq 0$$

$$a = \frac{P_u}{0.85 f'_c b}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Restricción por cuantía mínima:

$$g_3 = 0.01 b h - 2 A_s \leq 0$$

Restricción por cuantía máxima:

$$g_4 = 2 A_s - 0.08 b h \leq 0$$

Restricciones por dimensiones:

$$g_5 = 0.5 - \frac{b}{h} \leq 0$$

Restricción por pandeo:

$$g_6 = 2.33 \frac{L_u}{h} - 34 + 12 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \leq 0$$

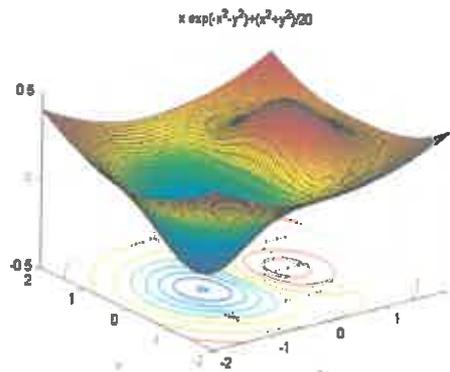
Restricción de borde:

$$30 \text{ cm} \leq b \leq 400 \text{ cm}$$

$$30 \text{ cm} \leq h \leq 400 \text{ cm}$$

RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Para la búsqueda de mínimos locales y globales presentamos un ejemplo de minimización de una función grafica de 03 dimensiones:



Las técnicas de optimización son usadas para encontrar los valores de las variables o de los parámetros de diseño, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, que de algún modo pueda ser definido como óptimo. Un caso simple puede ser la maximización o minimización de algún sistema característico que depende de x . En una formulación más avanzada la función objetivo $f(x)$ a ser minimizada o maximizada, podría ser sujeta a restricciones en la forma de restricciones de

igualdad $G_i(x) = 0$; restricciones de desigualdad $G_i(x) \leq 0$ y restricciones de borde, x_1 y x_u . Por lo tanto, el problema general puede ser formulado como:

$$\min_x f(x)$$

Sujeto a:

$$G_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e$$

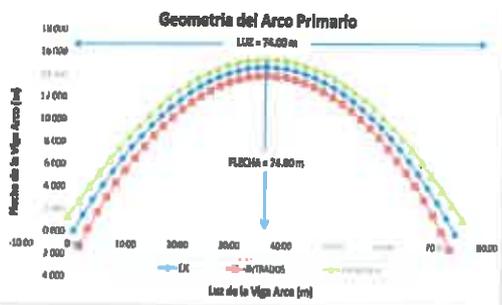
$$G_i(x) \leq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m$$

Donde x es el vector de parámetros de diseño de tamaño n , $f(x)$ es la función objetivo cuyo resultado es un valor escalar y el vector $G(x)$ retorna un vector de longitud m que contiene los valores de las restricciones de igualdad y desigualdad evaluadas en x .

6 RESULTADOS

PREDIMENCIONADO Y GEOMETRÍA

De acuerdo a la topografía se pudo conseguir un tramo con la distancia más corta de 99.90 m de luz del tablero para el puente y se presentó para el centro del claro una estructura de viga en arco de 74 metros con una flecha de 14.80 metros por tanto la relación $n=f/L$ es de $n=0.20$ geometría. Para el diseño de la viga en arco se dividieron en 41 estaciones con 40 elementos "frame" de 1.85 m de longitud horizontal cada uno.



RESULTADOS DE LAS SOLICITACIONES

La metodología del modelado con el SAP-2000 fue que se plantearon cuatro "lanes" o ejes de recorrido de la carga vehicular para el caso más

desfavorable en cuanto a la ubicación de estas con referencia al arco derecho: esto es a una distancia de 0.60 m del muro Yersey de protección y a 1.20 m de separación para las líneas de rueda de dos vehículos contiguos en doble sentido.

Combinación = Resistencia I

$$RI = \gamma_{PDC} \cdot Q_{PDC} + \gamma_{PDW} \cdot Q_{PDW} + \gamma_{LL+IM} \cdot Q_{LL+IM}$$

De acuerdo a la norma LRFD los factores de carga son:

$$RI = 1.25 \cdot Q_{PDC} + 1.50 \cdot Q_{PDW} + 1.75 \cdot Q_{LL+IM}$$

Para el caso de la Carga Viva:

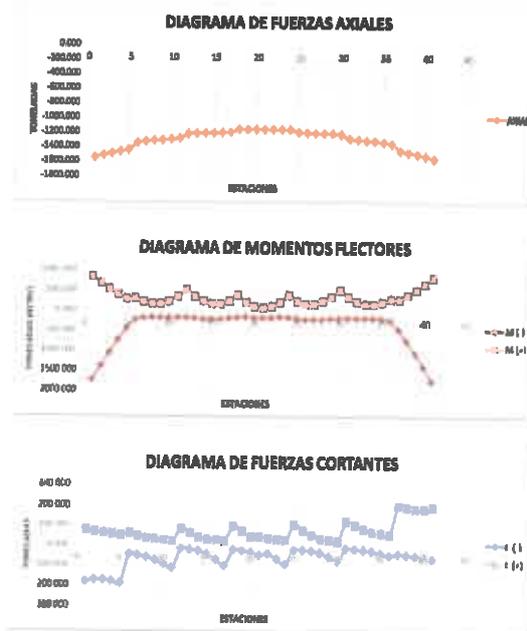
Carga vehicular= HL-93

Impacto por carga vehicular IM = 33%

Carga peatonal = 380 kgf/m

Donde:

- Pu = Carga axial última (en Tonf)
- M2u = Momento último en el eje secundario (Tonf-m)
- M3u = Momento último en el eje principal (Tonf-m)
- V2u = Cortante último en el eje principal (Tonf)
- V3u = Cortante último en el eje secundario (Tonf)
- Tu = Momento torsor último (Tonf-m)
- Lu = Semilongitud de viga arco a partir de la estación (m)



Diagramas de envolventes para la viga arco.

CONSTRUCCIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

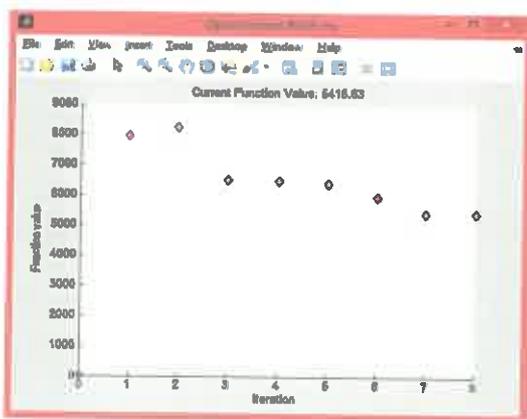
Para el análisis de la función objetivo se determinó los parámetros de la siguiente manera:

$$\min F = C_c b h + 2 C_s A_s + C_f (b + 2h)$$

PARAMETROS	VIGA ARCO
Concreto $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$ (Sf. /m3)	419.28
C_c (Sf. /cm2/m)	0.041928
Acero $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ (Sf. /kg)	4.54
C_s (Sf. /cm2/m)	3.5839
Encofrado (Sf. /m2)	457.00
C_f (Sf. /cm2/m)	4.57

RESULTADOS CON EL SQP

Para un primer cálculo y referencia de tendencia de las variables de diseño se pudo observar los resultados de las variables: $b=127.186 \text{ cm}$, $h=254.372 \text{ cm}$ y $A_s=161.76 \text{ cm}^2$.



Variación de los resultados de la función objetivo.

Estación	VIGA ARCO (TECNICA SQP)							
Parámetros	1	5	8	8	12	16	20	25
Pu (kgf)	1.92E+08	1.49E+08	1.17E+08	1.17E+08	1.23E+08	1.21E+08	1.17E+08	1.14E+08
Mu (kgf-cm)	1.82E+08	1.18E+08	8.26E+07	1.82E+07	5.62E+07	2.48E+07	4.18E+07	1.01E+07
b (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
h (cm)	284.372	272.190	183.549	135.830	118.271	77.119	68.869	69.674
Acero's (cm2)	180.761	171.862	148.168	116.876	86.379	57.941	70.4	52.251
ρ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
ρ (cm)	66.718	84.204	94.075	56.423	82.881	52.281	56.259	50.0
cc (cm)	78.807	75.534	88.823	85.38	82.88	83.521	89.126	89.059
ρ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
ρ (kgf)	3.31E+08	4.98E+08	4.39E+08	3.37E+08	2.49E+08	1.67E+08	2.02E+08	1.81E+08
ρ (kgf-cm)	2.19E+08	2.13E+08	1.82E+08	1.11E+08	8.19E+07	2.56E+07	8.98E+07	1.93E+07
SD	1.19E+0	1.09E+0	1.03E+0	1.04E+0	1.05E+0	1.06E+0	1.07E+0	1.08E+0
DCO (Sf. /m)	5670.081	5444.36	4708.49	3822.81	3078.54	2290.44	3425.34	2132.91
Nº (varillones)	8	8	8	7	6	5	6	5

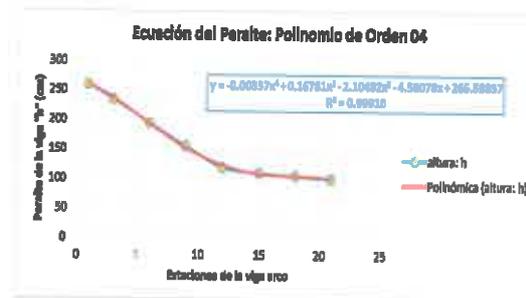
Salida de resultados para un diseño con SQP

Finalmente se redondearon los valores de diseño como son la variable "h" y como también para la variable "As" para un determinado número de varillas de ϕ 1 3/8 que tiene un área de acero de 9.58 cm^2 .

Estación	VIGA ARCO (MÓDULO REDONDEADOS PARA ELACEROS)							
Parámetros	1	5	8	8	12	16	20	25
b (cm)	150	150	150	150	150	150	150	150
h (cm)	260	271	195	135	120	75	68	69
Acero's (cm2)	201.19	182.02	113.39	114.54	95.8	66.72	66.22	75.64
Nº ϕ 1 3/8"	23	21	13	13	10	8	8	9
DCO (Sf. /m)	6181.08	5408.63	4788.66	3884.69	3219.01	2597.16	3182.04	2774.66
Ahorro	80%	16%	14%	14%	29%	39%	39%	17%

Valores finales de diseño.

La ecuación de regresión final más cercano a estos valores es la combinación de las dos mencionadas anteriormente con una ecuación de cuarto grado para el peralte "h", esta ecuación reemplazara a la fórmula de "arcos primarios".



Ecuación final del peralte de viga.

VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

Para construcciones de acero, aluminio y/u hormigón se pueden considerar los siguientes límites de deflexión.

Carga vehicular, general	Longitud/800
Cargas vehiculares y/o peatonales	Longitud/1000
Carga vehicular sobre voladizos	Longitud/300
Cargas vehiculares y/o peatonales sobre voladizos	Longitud/375

Límites de deflexión y desplazamientos.

Tomados en cuenta la luz total de la Viga Tipo Arco de Concreto Armado que es de 74 m entonces para el tipo de Cargas Vehiculares y/o peatonales tenemos: $74/1000=0.074$ metros los cuales serán constatados y verificados para el cumplimiento de la norma.

Podemos observar que para la estación 12 tenemos un desplazamiento de 8.7 mm que está ubicado a una distancia relativa de $L/4$ del arco.

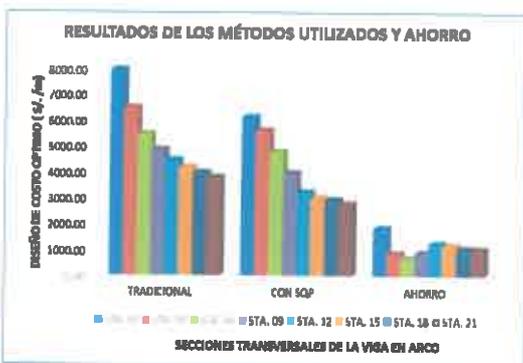
De acuerdo a la norma tenemos como máxima restricción de 74 mm para el desplazamiento vertical de los cuales podemos afirmar que son permisibles para el diseño de la viga en arco del puente de concreto armado.

CONTRASTE DEL COSTO DE LA VIGA ARCO

Se puede observar la comparación con los resultados finales el cual existe una diferencia considerable en cuanto a la diferencia entre el costo con método tradicional y el método SQP "el ahorro" en función al costo tradicional.

Método	VIGA ARCO: DISEÑO DE COSTO OPTIMO "DCO" (S./m)									
	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27
TRADICIONAL	7959,06	6081,66	5463,69	4961,22	4466,50	4175,86	3967,91	3801,71	3672,66	3572,66
CON SQP	6130,96	5008,69	4786,68	3964,68	3219,81	2907,24	2920,09	2772,66	2772,66	2772,66
AHORRO	1828,69	872,97	677,01	896,54	1246,69	1178,62	1047,82	1029,05	1029,05	1029,05
% DE AHORRO	23%	14%	12%	18%	28%	28%	26%	27%	27%	29%

Podemos concluir que nuestro método es bastante adecuado para la optimización por Diseño de Costo Óptimo (DCO), puesto que cada estación de la viga en arco (muestra representativa) siempre mantiene un ahorro por cada sección transversal.



Contraste de resultados del método tradicional y el método del SQP.

CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Para determinar que la Técnica SQP resulta ser una metodología óptima se realizó una prueba de comparación de medias entre el Diseño Tradicional y la Técnica SQP, a partir de las siguientes hipótesis:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Respecto a la altura se encontró que en promedio la diferencia de medias es de 54,75 cm. \pm 16,53 cm, toda vez que la altura en cada sección varía a lo largo de la luz del puente, además se identificó que la hipótesis nula se rechaza, dado que el nivel de significancia (p-value) es menor al 5%, es decir ambas metodologías son diferentes y que la Técnica SQP resulta ser óptima en el cálculo de dimensiones, dado que la diferencia de medias resulta ser positiva. Por otro lado, el parámetro DCO indica que en promedio las medias tienen una diferencia de S/. 1 096,5 \pm S/.345,3, es decir, los costos resultan ser mayores con el Diseño Tradicional y además se identificó que la hipótesis nula se rechaza, toda vez que el nivel de significancia (p-value) es menor al 5%, determinándose una vez más la optimalidad de la Técnica SQP.

Parámetro	Media	Dev. Est.	t-stat	Intervalo		P-value
				Máx.	Mín.	
h (cm)	54,75	16,58	9,5662	66,97	40,98	0,000
DCO (S./m)	1096,5	345,27	8,5825	1385,15	807,85	0,000

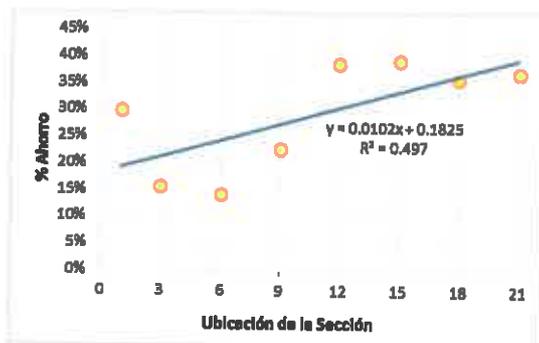
Prueba de diferencia de medias diseño tradicional VS SQP.

Se encuentra un resultado relevante el cual es el porcentaje de ahorro del DCO, que genera la técnica SQP en comparación con el Diseño Tradicional, estimándose que en promedio se ahorra un 29% \pm 10% en cada estación de la viga, lo que implica una mayor eficiencia en el uso de los recursos, principalmente en el uso del acero.

Parámetro	Media	Dev. Est.
% Ahorro	29,10%	10,40%

Se muestra la relación entre la sección y el porcentaje de ahorro encontrándose que existe una relación directa, es decir, a medida que se acerca a la parte central de la viga (sección 21), el porcentaje de ahorro resulta ser mayor, esto indica que el Diseño Tradicional en comparación con la Técnica SQP arroja dimensiones sobredimensionadas de los parámetros generando mayores costos. Específicamente se

establece que los mayores ahorros con la Técnica SQP se obtienen en las zonas donde la altura del peralte es menor, toda vez que la altura se reduce a medida que se aproxima a la parte central de la viga arco. Adicionalmente se encontró que mediante la Técnica SQP se consiguió ahorrar en un 30% en la estación de empotramiento (sección 01), en un 23 % para la estación ubicada a L/4 del claro (sección 09) y un 37% para la estación ubicada en la clave a L/2 de la viga arco (sección 21).



Relación de la ubicación y porcentaje de ahorro.

7 CONCLUSIONES

1.- Muchos autores en optimización estructural señalan que a la fecha los diseños estructurales son incompletos a causa de que dichos diseños son un resultado en el que sólo se considera el aspecto de resistencia, no tomándose en cuenta el factor económico el cual ocasiona diseños costosos en nuestra región de Huancavelica.

2.- El método SQP es una herramienta adecuada para resolver problemas de optimización no lineal restringida, esta también se aplica a diseños existentes como también para predimensionamientos de proyectos en desarrollo, el cual ayudarán a verificar que las estructuras no estén sobredimensionadas. Por tanto el Diseño de Costo Óptimo DCO se puede considerar como una alternativa técnica y económicamente viable para conseguir diseños bastante confiables y también cabe mencionar que esta técnica aportará considerablemente en diseños futuros.

3.- La técnica SQP planteada no solo se aplica también a diseños ya existentes sino que puede plantearse para realizar predimensionamientos de estructuras en desarrollo el cual ayuda a verificar que estas estructuras no estén sobredimensionadas, y como también para muchos tipos de problemas de optimización en proyectos de ingeniería en general.

4.- Se pudo obtener soluciones mucho más económicas en referencia a diseños tradicionales de la viga en arco: en un 30% para la estación 01 de empotramiento, en un 23 % para la estación 09 ubicado a L/4 y un 37% para la estación 21 clave del arco a L/2 centro del claro, por tanto se puede considerar al Diseño de Costo Óptimo (DCO) como una alternativa técnica y económicamente viable para proyectos de puentes.

8 RECOMENDACIONES

1.- Es recomendable el uso de programas como el SAP2000 y el CSI BRIDGE para el modelamiento matemático y reporte de resultados para las distintas solicitaciones de carga en la mayoría de los tipos de puentes ya que estos programas reflejaran los resultados de una manera muchísimo más próxima a la realidad y no utilizar métodos aproximados como es el caso del Método de Invariantes el cual es muy usado en el diseño de puentes en arco.

2.- Para el caso vigas en arco de luces muy grandes es recomendable contar con un número mayor de vigas diafragma para el arco conjuntamente con las columnas de transmisión de carga que en cierta medida acortan los tramos para el diseño, y además que la restricción de esbeltez g_6 no sea la más dominante en el diseño puesto que esta restricción genera secciones mucho más grandes en referencia a la restricción de resistencia g_1 y g_2 .

3.- Se recomienda el uso de la técnica SQP para la solución de muchos tipos de problemas de optimización los cuales pueden ser: muros de sostenimiento, edificaciones, redes de sistemas de tuberías de agua y alcantarillado, canales de irrigación, entre otros. Es

recomendable para cada tipo de problema revisar la normatividad vigente puesto que es imprescindible la implementación del SQP en función a cada tema para la resolución de los problemas arriba citados.

4.- Existen amplia bibliografía del tema del SQP hecha en inglés, pero se recomienda para un mejor entendimiento y comprensión del tema de Optimización con SQP el traducir los libros citados en inglés puesto que son los que mejor explican del tema.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Torroja Miret E. Razón y ser de los Tipos Estructurales. Reedición moderna ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; 1991.
2. Lozano D, Velásquez F, Zepeda A. Optimización Estructural de Forma en el Diseño de Cavidades en Elementos Planos Mediante Algoritmos Evolutivos; 2010.
3. Mollo M. Puente en Arco con Tablero Inferior con Péndolas de Cables Sobre el Río San Juan del Oro Bolivia; 2008.
4. Lapadula Sequera VA. Estudio comparativo sobre la aplicación de los algoritmos PSO y SQP en la optimización de pórticos planos de concreto armado Ingeniería Fd, editor. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana; 2014.
5. Seminario Manrique E. Guía para el Diseño de Puentes Piura: Repositorio Institucional PIRHUA; 2004.
6. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Diseño de Puentes 589-2003-MTC/02 RMN, editor. Lima: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles; 2003.
7. Demchenko Y. Sistemas de Construcción de Puentes Arcos Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2011.
8. Coello Coello CA, Santos Hernández F, Alonso Farrera FA. Diseño Óptimo de Vigas de Concreto Reforzado Mediante Algoritmos Genéticos México: Universidad Autónoma de Chiapas México; 2007.
9. Borda Flores JL, Rodriguez G. Optimización de Secciones Transversales de Pórticos de Hormigón Armado Mediante uso de la Técnica de Programación Cuadrática Secuencial SQP. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. 2010 Noviembre; XXIX.
10. Hennings Mariani E. Puente en Arco Tipo Network. Memoria de Cálculo y Planos. Cuzco; 2006.
11. Romaní Loayza SJ. Optimización de Estructuras Aporticadas de Concreto Armado UNI Idi, editor. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería; 2004.
12. X H, Y M X. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures Wiley J, Sons L, editors. New Delhi: Times by Aptara Inc.; 2010.
13. Hojjat A, Kalmal C S. Cost Optimization of Structures Wiley J, Sons L, editors. Pondicherry: Times by Integra Software Services Pvt. Ltd.; 2006.
14. Sánchez Caballero S. Optimización Estructural y Topológica de Estructuras Morfológicamente no Definidas Mediante Algoritmos Genéticos Valencia: Universitat Politècnica de Valencia; 2012.
15. Pérez Marqués M. Técnicas de Optimización con Matlab Middletown, DE: MathWorks; 2014.
16. Celorio Barragué L. Metodología Eficiente de Optimización de Diseño Basada en Fiabilidad Aplicada a Estructuras Rioja Udl, editor. Logroño: Publicaciones.unirioja.es; 2013.
17. MathWorks Inc. Optimization Toolbox User's Guide EE. UU.: MathWorks Inc.; 2013.
18. Mestas MD. Optimización Estructural Evolutiva: Desarrollo de una Aplicación de Computo para el Diseño Óptimo de Elementos Bajo Deformación Plana Coyoacán: Universidad Nacional Autónoma de México; 2010.

19. McCormac JC, H. Brown R. Diseño de Concreto Reforzado. 8th ed. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor S.A.; 2011.
20. Comité 318-S. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11) Michigan: American Concrete Institute; 2011.
21. Aranís García-Rossell C. Análisis y Diseño de Puentes de Concreto Armado Lima: Capítulo de Estudiantes de la Universidad Nacional de Ingeniería; 2006.
22. Empresa Editora Macro E.I.R.L. Manual de Diseño de Puentes Lima: Macro E.I.R.L.; 2010.
23. AASHTO. AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS Washington. DC: American Association of State Highway and Transportation Officials; 2012.
24. Instituto de la Construcción y Gerencia. Análisis, Diseño y Construcción de Puentes. 2nd ed. Lima: Fondo Editorial ICG; 2008.
25. Leet KM, Uang CM. Fundamentos de Análisis Estructural. 2nd ed. México: Mc Graw Hill; 2002.
26. Leontovich V. Pórticos y Arcos. 4th ed. Barcelona: Compañía Editorial Continental S. A.; 1970.
27. Riveros Jorge E. Puente Carrozable Ucañan. Memoria de cálculo. Huancavelica: CARITAS - HVCA., Huancavelica; 2001.
28. Morales R. Diseño en Concreto Armado. 3rd ed. ICG , editor. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia; 2006.
29. Hamsen E. T. Diseño de Estructuras de Concreto Armado. 4th ed. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú; 2005.
30. Ministerio de Vivienda. Reglamento Nacional de Edificaciones Lima: El Peruano; 2006.
31. HOB Consultores S. A. Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Huancavelica - Lircay, Tramo Km 1+550 (Av. Los Chancas) - Lircay. Expediente Técnico. Huancavelica: Ministerio de Transportes y Comunicaciones; 2013.
32. Cámara Peruana de la Construcción. Costos y Presupuestos en Edificación. 29th ed. Ramos Salazar J, editor. Lima: Capeco; 2013.
33. OPI Municipalidad Provincial de Huancavelica. Instalación del Puente Vehicular Alberto Benavides de la Quintana Sobre el Río Ichu, en el Barrio de San Cristóbal, Distrito de Huancavelica, Provincia de Huancavelica - Huancavelica. Código SNIP 256944. Huancavelica: Sistema Nacional de Inversión Pública; 2013.

ANEXOS

ANEXO 1

Predimensionamiento de la Viga Arco del Puente Tipo Arco de concreto Armado

1. METRADO DE CARGAS

L =	74 m
WD =	108,79 tn/ml
WL =	24,35 tn/ml
	kg/c
f _c =	210 m ²

CARGA UNIFORMEMENTE REPARTIDA

L calculo = 74

PESO PROPIO

	pe	b	h	a	nº	W (tn/m)	PESO (tn)
Losa Masisa	2,40	11,40	0,20		1	5,47	404,93
Viga Longitudinal	2,40	0,40	0,70		4	2,69	198,91
Viga Arco	2,40	2,00	3,50		2	33,60	2486,40
Diafragma	2,40	0,30	0,70	11,40	13	1,01	74,69
Viga de Arriostre	2,40	0,30	0,60	6,95	2	0,08	6,00
Diafragma Arco	2,40	0,50	1,00	5,95	6	0,58	42,84
Columnas	2,40	0,60	1,00	18,00	4	1,40	103,68
					DC =	44,83	3317,46

DC -
VIGA

PESO ASFALTO E INSTALACIONES

Asfalto e=2"	2,25	7,2	0,1		1	1,62	119,88
Muro Yersey	0,50				2	1,00	74,00
Barandas	0,20				2	0,40	29,60
Instalaciones	0,50				1	0,50	37,00
					DW =	3,52	260,48

CARGA VIVA

Sobrecarga	0,97	por cada 3.00 m en 7.20 m son			2,4	2,33	172,27
Carga peatonal	0,36	tn por m ²		1,5	2	1,08	79,92
					WL =	3,41	252,19

EQUIVALENTE HL-93

Sobrecarga	truk	32,65	02 carriles	2	05 camiones	5	4,41	326,50
	tándem	22,4	02 carriles	2	07 camiones	7	4,24	313,60

ANEXO 2

Diseño de la Viga Arco del Puente Tipo Arco de concreto Armado

1. ELEMENTOS GEOMETRICOS DE LA VIGA ARCO PARABOLICO

1.1. DATOS

FLECHA	f =	14,80 m
LONGITUD	L =	74,00 m
ESPEJOR DE CLAVE	e _o =	1,50 m
ESPEJOR DE ARRANQUE	e _a =	3,50 m
BASE DE LA VIGA ARCO	b =	2,00 m

1.2. AREA DE LA VIGA PARABOLICA:

1.2.1. ANGULO DE ARANQUE

$$\varphi_a = \arctan\left(\frac{4 \cdot f}{L}\right)$$

$$\varphi_a = 38,6598^\circ$$

1.2.2. ANGULO EN L/4 DE LA SECCION DEL EJE

$$\varphi = \arctan\left(\frac{4 \cdot f}{L} \left(1 - \frac{2 \cdot x}{L}\right)\right)$$

$$\varphi = 21,8014^\circ$$

1.2.3. ESPESOR DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA VIGA A L/4

CONSTANTE DEL ARCO:

$$K = \frac{I_o}{I_a \cdot \cos \varphi_a} = \left(\frac{e_o}{e_a}\right)^3 \cdot \frac{1}{\cos \varphi_a}$$

$$K = 0,101$$

$$e = \frac{e_o}{\left[\cos \varphi \cdot \left(1 - (1 - K) \cdot \frac{2 \cdot x}{L}\right)\right]^{1/3}}$$

$$e = 1,876 \text{ m}$$

1.2.4. RELACION ENTRE LA FLECHA Y LA LONGITUD

$$n = f/L = 0,2000$$

1.2.5. LONGITUD DEL ARCO PARABOLICO

$$L_{cp} = L \left(1 + \frac{8}{3} \cdot n^2 - \frac{32}{5} \cdot n^4 + \frac{256}{7} \cdot n^2 \right)$$

$$L_{cp} = 81,309 \text{ m}$$

1.2.6. AREA TOTAL DE LA VIGA

$$S = \frac{L_{cp}}{6} (e_a + 4 \cdot e + e_o)$$

$$S = 169,457 \text{ m}^2$$

1.2.7. AREA RECTANGULAR DE LA VIGA PARA CARGA UNIFORME

$$S_a = e_o \cdot L = 111 \text{ m}^2$$

1.2.8. AREA PARABOLICA COMPLEMENTARIA DE LA VIGA

$$S_p = S - S_a = 58,457 \text{ m}^2$$

ANEXO 3

Diseño de los elementos geométricos de arcos primarios

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS GEOMETRICOS DE ARCOS PRIMARIOS

Luz de diseño = 74.00

Clave de arco: eo = 1.50

Arranque de arco: ϵ = 3.50

Flecha = 14.80

Constante de arco: K = 0.10

n = f/L = 0.2

EST.	COORDENADAS		ANGULO INCLINADO		COSENO	$1-(1-k)2y/L$	PERALTE e (m)	COORD. INTRADOS		COORD. EXTRADOS	
	X	Y	ϕ	grad	cos ϕ			X	Y	X	Y
1	0.00	0.000	0.675	38.66	0.781	0.101	3.50	1.093	-1.367	-1.093	1.367
2	1.85	1.443	0.650	37.23	0.796	0.146	3.08	2.780	0.219	0.920	2.667
3	3.70	2.812	0.624	35.75	0.812	0.191	2.79	4.516	1.678	2.884	3.946
4	5.55	4.107	0.597	34.22	0.827	0.236	2.59	6.277	3.037	4.823	5.177
5	7.40	5.328	0.569	32.62	0.842	0.281	2.43	8.054	4.306	6.746	6.350
6	9.25	6.475	0.540	30.96	0.857	0.326	2.30	9.840	5.491	8.660	7.459
7	11.10	7.548	0.510	29.25	0.873	0.371	2.19	11.634	6.595	10.566	8.501
8	12.95	8.547	0.480	27.47	0.887	0.416	2.09	13.433	7.619	12.467	9.475
9	14.80	9.472	0.448	25.64	0.902	0.460	2.01	15.235	8.566	14.365	10.378
10	16.65	10.323	0.415	23.75	0.915	0.505	1.94	17.041	9.435	16.259	11.211
11	18.50	11.100	0.381	21.80	0.928	0.550	1.88	18.848	10.229	18.152	11.971
12	20.35	11.803	0.346	19.80	0.941	0.595	1.82	20.658	10.947	20.042	12.659
13	22.20	12.432	0.310	17.74	0.952	0.640	1.77	22.470	11.590	21.930	13.274
14	24.05	12.987	0.273	15.64	0.963	0.685	1.72	24.282	12.157	23.818	13.817
15	25.90	13.468	0.236	13.50	0.972	0.730	1.68	26.096	12.651	25.704	14.285
16	27.75	13.875	0.197	11.31	0.981	0.775	1.64	27.911	13.069	27.589	14.681
17	29.60	14.208	0.159	9.09	0.987	0.820	1.61	29.727	13.413	29.473	15.003
18	31.45	14.467	0.119	6.84	0.993	0.865	1.58	31.544	13.684	31.356	15.250
19	33.30	14.652	0.080	4.57	0.997	0.910	1.55	33.362	13.880	33.238	15.424
20	35.15	14.763	0.040	2.29	0.999	0.955	1.52	35.180	14.002	35.120	15.524
21	37.00	14.800	0.000	0.00	1.000	1.000	1.50	37.000	14.050	37.000	15.550
22	38.85	14.763	-0.040	-2.29	0.999	0.955	1.52	38.820	14.002	38.880	15.524
23	40.70	14.652	-0.080	-4.57	0.997	0.910	1.55	40.638	13.880	40.762	15.424
24	42.55	14.467	-0.119	-6.84	0.993	0.865	1.58	42.456	13.684	42.644	15.250
25	44.40	14.208	-0.159	-9.09	0.987	0.820	1.61	44.273	13.413	44.527	15.003
26	46.25	13.875	-0.197	-11.31	0.981	0.775	1.64	46.089	13.069	46.411	14.681
27	48.10	13.468	-0.236	-13.50	0.972	0.730	1.68	47.904	12.651	48.296	14.285
28	49.95	12.987	-0.273	-15.64	0.963	0.685	1.72	49.718	12.157	50.182	13.817
29	51.80	12.432	-0.310	-17.74	0.952	0.640	1.77	51.530	11.590	52.070	13.274
30	53.65	11.803	-0.346	-19.80	0.941	0.595	1.82	53.342	10.947	53.958	12.659
31	55.50	11.100	-0.381	-21.80	0.928	0.550	1.88	55.152	10.229	55.848	11.971
32	57.35	10.323	-0.415	-23.75	0.915	0.505	1.94	56.959	9.435	57.741	11.211
33	59.20	9.472	-0.448	-25.64	0.902	0.460	2.01	58.765	8.566	59.635	10.378
34	61.05	8.547	-0.480	-27.47	0.887	0.416	2.09	60.567	7.619	61.533	9.475
35	62.90	7.548	-0.510	-29.25	0.873	0.371	2.19	62.366	6.595	63.434	8.501
36	64.75	6.475	-0.540	-30.96	0.857	0.326	2.30	64.160	5.491	65.340	7.459
37	66.60	5.328	-0.569	-32.62	0.842	0.281	2.43	65.946	4.306	67.254	6.350
38	68.45	4.107	-0.597	-34.22	0.827	0.236	2.59	67.723	3.037	69.177	5.177
39	70.30	2.812	-0.624	-35.75	0.812	0.191	2.79	69.484	1.678	71.116	3.946
40	72.15	1.443	-0.650	-37.23	0.796	0.146	3.08	71.220	0.219	73.080	2.667
41	74.00	0.000	-0.675	-38.66	0.781	0.101	3.50	72.907	-1.367	75.093	1.367

ANEXO 4

Resumen reporte de diagramas (Módulo CSI BRIDGE - SAP 2000)

Elementos	Diagrama de Fuerzas Axiales	Diagrama de Momentos Flectores	Diagrama de Fuerzas Cortantes
Asfalto			
Peso Propio			
Peatonal			
Temperatura			
Carga Móvil de Vehículos (Máxima)			
Carga Móvil de Vehículos (Mínima)			
Envolvente RESISTENCIA			

ANEXO 5

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS



Logo of the Ministry of Transport and Communications of Peru (Ministerio de Transportes y Comunicaciones) and the Regional Government of Lima (GOBIERNO REGIONAL LIMA).

Estudio Definitivo de la Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Huancavelica – Lircay, Tramo Km. 1+550 (Av. Los Chancas) - Lircay



COMPONENTE DE INGENIERIA



HOB CONSULTORES S.A. ORIGINAL

Análisis de precios unitarios

Presupuesto	0201018	ESTUDIO DEFINITIVO PARA LA REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA HUANGAVELICA - LIRCAY		Fecha	31/10/2013		
Subpresupuesto	005	TRAMO: KM 1+850 (AV. LOS CHANCAS) - LIRCAY					
Partida	610.C1	CONCRETO CLASE C (F'c = 280 KG/CM2)					
Rendimiento	m3/DIA	MO. 18.0000	EQ. 18.0000				
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$i.	Costo unitario directo por : m3	
						Parcial \$i.	
Mano de Obra							
0147010002	OPERARIO	hh	3.0000	1.3333	18.89		418.28
0147010003	OFICIAL	hh	3.0000	1.3333	14.35		22.52
0147010004	PEON	hh	6.0000	2.6667	12.95		19.13
0147010031	CAPATAZ "A"	hh	0.5000	0.2222	21.96		34.53
							4.88
							81.08
Materiales							
0221000001	CEMENTO PORTLAND TIPO I (42.5 kg)	bis		11.0000	19.41		213.51
0230190000	CURADOR DE CONCRETO	gal		0.1760	14.88		2.62
0230520007	ADITIVO INCORPORADOR DE AIRE	kg		0.5600	6.27		3.46
0253000008	GASOLINA 84 OCTANOS	gal		0.3800	10.66		4.05
0253000010	LUBRICANTES, FILTROS Y GRASA	%EO		5.0000	6.74		0.34
							223.97
Equipos							
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	81.06		4.06
0348010007	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 11p3 18 HP	hm	1.0000	0.4444	9.60		4.27
910314030301	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.50"	hm	1.0000	0.4444	5.55		2.47
							10.79
Subpartidas							
910304110101	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.2300	17.67		4.06
910307010192	TRANSPORTE DE AGREGADOS PARA CONCRETOS	m3		1.2500	49.59		61.99
910308010128	PIEDRA CHANCADA	m3		0.7500	35.49		26.62
910308010130	ARENA ZARANDEADA	m3		0.5000	21.54		10.77
							103.44
Partida	610.D1	CONCRETO CLASE D (F'c = 210 KG/CM2)					
Rendimiento	m3/DIA	MO. 18.0000	EQ. 18.0000				
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$i.	Costo unitario directo por : m3	
						Parcial \$i.	378.28
Mano de Obra							
0147010002	OPERARIO	hh	3.0000	1.3333	18.89		22.52
0147010003	OFICIAL	hh	3.0000	1.3333	14.35		19.13
0147010004	PEON	hh	6.0000	2.6667	12.95		34.53
0147010031	CAPATAZ "A"	hh	0.5000	0.2222	21.96		4.88
							81.08
Materiales							
0221000001	CEMENTO PORTLAND TIPO I (42.5 kg)	bis		8.0000	19.41		174.88
0230190000	CURADOR DE CONCRETO	gal		0.1760	14.88		2.62
0230520007	ADITIVO INCORPORADOR DE AIRE	kg		0.4500	6.27		2.82
0253000008	GASOLINA 84 OCTANOS	gal		0.3800	10.66		4.05
0253000010	LUBRICANTES, FILTROS Y GRASA	%EO		5.0000	6.74		0.34
							184.52
Equipos							
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	81.06		4.06
0348010007	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 11p3 18 HP	hm	1.0000	0.4444	9.60		4.27
910314030301	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.50"	hm	1.0000	0.4444	5.55		2.47
							10.79
Subpartidas							
910304110101	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.2000	17.87		3.53
910307010192	TRANSPORTE DE AGREGADOS PARA CONCRETOS	m3		1.2500	49.59		61.99
910308010128	PIEDRA CHANCADA	m3		0.7500	35.49		26.62
910308010130	ARENA ZARANDEADA	m3		0.5000	21.54		10.77
							103.91



HOB CONSULTORES S.A.

FRANCO CONSULTORES S.A.

INFORMACIÓN GENERAL
 EN: ALAS ALGUN FUENTE ARREVALO
 EN: ALAS ALGUN FUENTE ARREVALO
 CIP Nº 21729

INFORMACIÓN GENERAL
 EN: ALAS ALGUN FUENTE ARREVALO
 EN: ALAS ALGUN FUENTE ARREVALO
 CIP Nº 21729

Análisis de precios unitarios

Presupuesto	0201019	ESTUDIO DEFINITIVO PARA LA REHABILITACIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA HUANCAMELICA - LIRCAY		Fecha	31/10/2013		
Subpresupuesto	005	TRAMO: KM 1+550 (AV. LOS CHANGAS) - LIRCAY					
Partida	618.J	CONCRETO CLASE J (FC = 175 KG/CM2 + 30% PG)					
Rendimiento	m3/DIA	MO. 18.0000	EQ. 18.0000				
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Costo unitario directo por : m3		295.52
					Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.
0147010004	PEON		hh	4.0000	1.7778	12.96	23.02
	Mano de Obra						23.02
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	23.02	1.15
	Equipos						1.15
910301081005	CONCRETO CLASE E (FC = 175 KG/CM2)		m3		0.7000	348.73	244.81
910301100508	PIEDRA GRANDE		m3		0.3000	88.46	26.54
	Subpartidas						271.35
Partida	612.A	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO					
Rendimiento	m2/DIA	MO. 14.0000	EQ. 14.0000				
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Costo unitario directo por : m2		53.85
					Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.
0147010002	OPERARIO		hh	1.0000	0.5714	16.89	9.65
0147010003	OFICIAL		hh	1.0000	0.5714	14.35	8.20
0147010004	PEON		hh	2.0000	1.1429	12.96	14.80
0147010031	CAPATAZ "A"		hh	0.1000	0.0571	21.96	1.25
	Mano de Obra						33.80
0202000015	ALAMBRE NEGRO # 8		kg		0.2000	3.10	0.62
0202010022	CLAVOS DIFERENTES MEDIDAS		kg		0.2000	3.69	0.74
0230110014	DESMOLDANTE PARA MADERA		gal		0.0600	29.27	1.76
0243040000	MADERA TORNILLO		p2		1.7500	5.06	8.88
0245010002	TRIPLAY DE 18 mm PARA ENCOFRADO		pl		0.0700	89.64	6.27
	Materiales						18.25
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	33.90	1.70
	Equipos						1.70
Partida	612.B	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO BAJO AGUA					
Rendimiento	m2/DIA	MO. 14.0000	EQ. 14.0000				
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Costo unitario directo por : m2		94.91
					Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.
0147010002	OPERARIO		hh	1.0000	0.5714	16.89	9.65
0147010003	OFICIAL		hh	1.0000	0.5714	14.35	8.20
0147010004	PEON		hh	2.0000	1.1429	12.96	14.80
0147010031	CAPATAZ "A"		hh	0.1000	0.0571	21.96	1.25
	Mano de Obra						33.80
0202000015	ALAMBRE NEGRO # 8		kg		0.2000	3.10	0.62
0202010022	CLAVOS DIFERENTES MEDIDAS		kg		0.2000	3.69	0.74
0230110014	DESMOLDANTE PARA MADERA		gal		0.0600	29.27	1.76
0243040000	MADERA TORNILLO		p2		1.7500	5.06	8.88
0245010002	TRIPLAY DE 18 mm PARA ENCOFRADO		pl		0.0700	89.64	6.27
	Materiales						18.25
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	33.90	1.70
910314020102	MOTOBOMBA 34 HP 8"		hm	1.0000	0.5714	65.93	37.67
	Equipos						39.37
0401210001	BONIFICACION POR TRABAJOS BAJO AGUA		%MO		10.0000	33.90	3.39
	Subcontratos						3.39



HOB CONSULTORES S.A.

HOB CONSULTORES S.A.

ING. ALBA MARIN ALBERTA ARRIAGA
 ESP. INGENIERO EN CIVIL Y PRESUPUESTOS
 CIP N° 121249

ING. ALBA MARIN ALBERTA ARRIAGA
 ESP. INGENIERO EN CIVIL Y PRESUPUESTOS
 CIP N° 121249

Análisis de precios unitarios

Partida	612.A	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO					
Rendimiento	m2/DIA	14.0000	EQ. 14.0000			Costo unitario directo por : m2	53.85
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra							
OPERARIO		hh	1.0000	0.5714	16.89	9.65	
OFICIAL		hh	1.0000	0.5714	14.35	8.20	
PEON		hh	2.0000	1.1429	12.95	14.80	
CAPATAZ "A"		hh	0.1000	0.0571	21.95	1.25	
						33.91	
Materiales							
ALAMBRE NEGRO N° 8		kg		0.2000	3.10	0.62	
CLAVOS DIFERENTES MEDIDAS		kg		0.2000	3.69	0.74	
DESMOLDANTE PARA MADERA		gal		0.0800	29.27	1.76	
MADERA TORNILLO		p2		1.7500	5.08	8.86	
TRIPLAY DE 18 mm PARA ENCOFRADO		pl		0.0700	89.64	6.27	
						18.24	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	33.91	1.70	
						1.70	

Partida	612.A	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO PARA VIGAS PRINCIPALES TIPO ARCO					
Rendimiento	m2/DIA	10.0000	EQ. 10.0000			Costo unitario directo por : m2	457.00
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra							
OPERARIO		hh	1.0000	0.8000	16.89	13.51	
OFICIAL		hh	1.0000	0.8000	14.35	11.48	
PEON		hh	2.0000	1.6000	12.95	20.72	
CAPATAZ "A"		hh	0.1000	0.0800	21.95	1.76	
						47.47	
Materiales							
ALAMBRE NEGRO N° 8		kg		0.2100	3.10	0.65	
CLAVOS DIFERENTES MEDIDAS		kg		0.4800	3.69	1.77	
DESMOLDANTE PARA MADERA		gal		0.0800	29.27	1.76	
MADERA TORNILLO		p2		78.4000	5.08	396.70	
TRIPLAY DE 18 mm PARA ENCOFRADO		pl		0.0700	89.64	6.27	
						407.16	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	47.47	2.37	
						2.37	

Variación y adaptación del Análisis de precios unitarios para una viga principal en arco.

8. Frame results

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
13	0.48286	PEATONAL	-0.04767	-0.13134	0.72031
13	0.96573	PEATONAL	-0.04767	-0.14521	-0.10333
13	1.44859	PEATONAL	-0.04767	-0.15908	-0.92697
13	1.93146	PEATONAL	-0.04767	-0.17295	-1.75060
13	0.00000	ASFAL-ACCE	0.09295	0.26541	3.05486
13	0.48286	ASFAL-ACCE	0.09295	0.29800	1.41237
13	0.96573	ASFAL-ACCE	0.09295	0.33058	-0.23012
13	1.44859	ASFAL-ACCE	0.09295	0.36317	-1.87261
13	1.93146	ASFAL-ACCE	0.09295	0.39576	-3.51510
13	0.00000	TEMP	0.02295	0.02041	-4.81269
13	0.48286	TEMP	0.02295	0.01902	-6.77490
13	0.96573	TEMP	0.02295	0.01762	-8.73711
13	1.44859	TEMP	0.02295	0.01623	-10.69932
13	1.93146	TEMP	0.02295	0.01483	-12.66153
14	0.00000	DEAD	-0.14879	-0.47653	23.23165
14	0.47788	DEAD	-0.14879	-0.44089	20.55146
14	0.95575	DEAD	-0.14879	-0.40526	16.04655
14	1.43363	DEAD	-0.14879	-0.36963	9.71691
14	1.91151	DEAD	-0.14879	-0.33400	1.56254
14	0.00000	PEATONAL	-0.05405	-0.17106	-1.75060
14	0.47788	PEATONAL	-0.05405	-0.18479	-1.94984
14	0.95575	PEATONAL	-0.05405	-0.19851	-2.14907
14	1.43363	PEATONAL	-0.05405	-0.21224	-2.34830
14	1.91151	PEATONAL	-0.05405	-0.22596	-2.54753
14	0.00000	ASFAL-ACCE	0.10756	0.39204	-3.51510
14	0.47788	ASFAL-ACCE	0.10756	0.42429	-3.91033
14	0.95575	ASFAL-ACCE	0.10756	0.45654	-4.30557
14	1.43363	ASFAL-ACCE	0.10756	0.48879	-4.70081
14	1.91151	ASFAL-ACCE	0.10756	0.52104	-5.09605
14	0.00000	TEMP	0.02349	0.01397	-12.66153
14	0.47788	TEMP	0.02349	0.01259	-14.33122
14	0.95575	TEMP	0.02349	0.01121	-16.00090
14	1.43363	TEMP	0.02349	0.00983	-17.67058
14	1.91151	TEMP	0.02349	0.00845	-19.34027
15	0.00000	DEAD	-0.16132	-0.32814	1.56254
15	0.47356	DEAD	-0.16132	-0.29283	3.53417
15	0.94712	DEAD	-0.16132	-0.25752	3.73960
15	1.42068	DEAD	-0.16132	-0.22221	2.17884
15	1.89424	DEAD	-0.16132	-0.18690	-1.14811
15	0.00000	PEATONAL	-0.06256	-0.22376	-2.54753
15	0.47356	PEATONAL	-0.06256	-0.23736	-2.12235
15	0.94712	PEATONAL	-0.06256	-0.25096	-1.69718
15	1.42068	PEATONAL	-0.06256	-0.26456	-1.27200
15	1.89424	PEATONAL	-0.06256	-0.27816	-0.84682
15	0.00000	ASFAL-ACCE	0.12718	0.51660	-5.09605
15	0.47356	ASFAL-ACCE	0.12718	0.54856	-4.24403
15	0.94712	ASFAL-ACCE	0.12718	0.58052	-3.39202
15	1.42068	ASFAL-ACCE	0.12718	0.61248	-2.54001
15	1.89424	ASFAL-ACCE	0.12718	0.64444	-1.68799
15	0.00000	TEMP	0.02379	0.00756	-19.34027
15	0.47356	TEMP	0.02379	0.00619	-20.71743
15	0.94712	TEMP	0.02379	0.00482	-22.09459
15	1.42068	TEMP	0.02379	0.00345	-23.47175
15	1.89424	TEMP	0.02379	0.00209	-24.84890
16	0.00000	DEAD	-0.16838	-0.18056	-1.14811
16	0.46993	DEAD	-0.16838	-0.14552	5.70782
16	0.93987	DEAD	-0.16838	-0.11048	10.85283
16	1.40980	DEAD	-0.16838	-0.07544	14.28690
16	1.87973	DEAD	-0.16838	-0.04040	16.01004

3. Frame results

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
16	0.00000	PEATONAL	-0.07321	-0.27555	-0.84682
16	0.46993	PEATONAL	-0.07321	-0.28905	0.20276
16	0.93987	PEATONAL	-0.07321	-0.30254	1.25235
16	1.40980	PEATONAL	-0.07321	-0.31604	2.30194
16	1.87973	PEATONAL	-0.07321	-0.32954	3.35152
16	0.00000	ASFAL-ACCE	0.15187	0.83907	-1.68799
16	0.46993	ASFAL-ACCE	0.15187	0.87079	0.41128
16	0.93987	ASFAL-ACCE	0.15187	0.70250	2.51054
16	1.40980	ASFAL-ACCE	0.15187	0.73422	4.60981
16	1.87973	ASFAL-ACCE	0.15187	0.76593	6.70907
16	0.00000	TEMP	0.02385	0.00117	-24.84890
16	0.46993	TEMP	0.02385	-0.00019	-25.93354
16	0.93987	TEMP	0.02385	-0.00154	-27.01817
16	1.40980	TEMP	0.02385	-0.00290	-28.10281
16	1.87973	TEMP	0.02385	-0.00426	-29.18744
17	0.00000	DEAD	-0.16983	-0.03381	16.01004
17	0.46701	DEAD	-0.16983	0.00101	27.96456
17	0.93402	DEAD	-0.16983	0.03584	38.24990
17	1.40103	DEAD	-0.16983	0.07068	46.86604
17	1.86804	DEAD	-0.16983	0.10548	53.81300
17	0.00000	PEATONAL	-0.08600	-0.32643	3.35152
17	0.46701	PEATONAL	-0.08600	-0.33984	5.02551
17	0.93402	PEATONAL	-0.08600	-0.35326	6.69951
17	1.40103	PEATONAL	-0.08600	-0.36667	8.37350
17	1.86804	PEATONAL	-0.08600	-0.38008	10.04750
17	0.00000	ASFAL-ACCE	0.18161	0.75943	6.70907
17	0.46701	ASFAL-ACCE	0.18161	0.79095	10.05559
17	0.93402	ASFAL-ACCE	0.18161	0.82246	13.40211
17	1.40103	ASFAL-ACCE	0.18161	0.85398	16.74863
17	1.86804	ASFAL-ACCE	0.18161	0.88550	20.09515
17	0.00000	TEMP	0.02367	-0.00519	-29.18744
17	0.46701	TEMP	0.02367	-0.00654	-29.97955
17	0.93402	TEMP	0.02367	-0.00788	-30.77166
17	1.40103	TEMP	0.02367	-0.00923	-31.56376
17	1.86804	TEMP	0.02367	-0.01058	-32.35587
18	0.00000	DEAD	-0.01070	0.10702	47.96176
18	0.46481	DEAD	-0.01070	0.10702	36.61377
18	0.92961	DEAD	-0.01070	0.10702	23.63542
18	1.39442	DEAD	-0.01070	0.10702	9.02672
18	1.85923	DEAD	-0.01070	0.10702	-7.21234
18	0.00000	PEATONAL	0.03508	-0.35078	9.26859
18	0.46481	PEATONAL	0.03508	-0.35078	7.72402
18	0.92961	PEATONAL	0.03508	-0.35078	6.17945
18	1.39442	PEATONAL	0.03508	-0.35078	4.63488
18	1.85923	PEATONAL	0.03508	-0.35078	3.09031
18	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.08118	0.81179	18.53523
18	0.46481	ASFAL-ACCE	-0.08118	0.81179	15.44986
18	0.92961	ASFAL-ACCE	-0.08118	0.81179	12.36448
18	1.39442	ASFAL-ACCE	-0.08118	0.81179	9.27911
18	1.85923	ASFAL-ACCE	-0.08118	0.81179	6.19374
18	0.00000	TEMP	-0.00085	0.00854	-23.06835
18	0.46481	TEMP	-0.00085	0.00854	-23.99453
18	0.92961	TEMP	-0.00085	0.00854	-24.92072
18	1.39442	TEMP	-0.00085	0.00854	-25.84690
18	1.85923	TEMP	-0.00085	0.00854	-26.77309
19	0.00000	DEAD	-0.00644	0.10736	-7.21234
19	0.46333	DEAD	-0.00644	0.10736	-13.19357
19	0.92666	DEAD	-0.00644	0.10736	-20.76913
19	1.39000	DEAD	-0.00644	0.10736	-29.93901

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
19	1.85333	DEAD	-0.00644	0.10736	-40.70321
19	0.00000	PEATONAL	0.02111	-0.35189	3.09031
19	0.46333	PEATONAL	0.02111	-0.35189	2.16356
19	0.92666	PEATONAL	0.02111	-0.35189	1.23682
19	1.39000	PEATONAL	0.02111	-0.35189	0.31008
19	1.85333	PEATONAL	0.02111	-0.35189	-0.61666
19	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.04886	0.81438	6.19374
19	0.46333	ASFAL-ACCE	-0.04886	0.81438	4.34251
19	0.92666	ASFAL-ACCE	-0.04886	0.81438	2.49129
19	1.39000	ASFAL-ACCE	-0.04886	0.81438	0.64007
19	1.85333	ASFAL-ACCE	-0.04886	0.81438	-1.21116
19	0.00000	TEMP	-0.00051	0.00857	-26.77309
19	0.46333	TEMP	-0.00051	0.00857	-27.32880
19	0.92666	TEMP	-0.00051	0.00857	-27.88451
19	1.39000	TEMP	-0.00051	0.00857	-28.44022
19	1.85333	TEMP	-0.00051	0.00857	-28.99593
20	0.00000	DEAD	-0.00215	0.10754	-40.70321
20	0.46259	DEAD	-0.00215	0.10754	-41.17489
20	0.92518	DEAD	-0.00215	0.10754	-43.20755
20	1.38778	DEAD	-0.00215	0.10754	-46.80117
20	1.85037	DEAD	-0.00215	0.10754	-51.95577
20	0.00000	PEATONAL	0.00705	-0.35245	-0.61666
20	0.46259	PEATONAL	0.00705	-0.35245	-0.92558
20	0.92518	PEATONAL	0.00705	-0.35245	-1.23449
20	1.38778	PEATONAL	0.00705	-0.35245	-1.54340
20	1.85037	PEATONAL	0.00705	-0.35245	-1.85232
20	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.01631	0.81568	-1.21116
20	0.46259	ASFAL-ACCE	-0.01631	0.81568	-1.82823
20	0.92518	ASFAL-ACCE	-0.01631	0.81568	-2.44531
20	1.38778	ASFAL-ACCE	-0.01631	0.81568	-3.06238
20	1.85037	ASFAL-ACCE	-0.01631	0.81568	-3.67945
20	0.00000	TEMP	-0.00017	0.00858	-28.99593
20	0.46259	TEMP.	-0.00017	0.00858	-29.18116
20	0.92518	TEMP	-0.00017	0.00858	-29.36640
20	1.38778	TEMP	-0.00017	0.00858	-29.55164
20	1.85037	TEMP	-0.00017	0.00858	-29.73687
21	0.00000	DEAD	0.00215	0.10754	-51.95577
21	0.46259	DEAD	0.00215	0.10754	-46.80117
21	0.92518	DEAD	0.00215	0.10754	-43.20755
21	1.38778	DEAD	0.00215	0.10754	-41.17489
21	1.85037	DEAD	0.00215	0.10754	-40.70321
21	0.00000	PEATONAL	-0.00705	-0.35245	-1.85232
21	0.46259	PEATONAL	-0.00705	-0.35245	-1.54340
21	0.92518	PEATONAL	-0.00705	-0.35245	-1.23449
21	1.38778	PEATONAL	-0.00705	-0.35245	-0.92558
21	1.85037	PEATONAL	-0.00705	-0.35245	-0.61666
21	0.00000	ASFAL-ACCE	0.01631	0.81568	-3.67945
21	0.46259	ASFAL-ACCE	0.01631	0.81568	-3.06238
21	0.92518	ASFAL-ACCE	0.01631	0.81568	-2.44531
21	1.38778	ASFAL-ACCE	0.01631	0.81568	-1.82823
21	1.85037	ASFAL-ACCE	0.01631	0.81568	-1.21116
21	0.00000	TEMP	0.00017	0.00858	-29.73687
21	0.46259	TEMP	0.00017	0.00858	-29.55164
21	0.92518	TEMP	0.00017	0.00858	-29.36640
21	1.38778	TEMP	0.00017	0.00858	-29.18116
21	1.85037	TEMP	0.00017	0.00858	-28.99593
22	0.00000	DEAD	0.00644	0.10736	-40.70321
22	0.46333	DEAD	0.00644	0.10736	-29.93901
22	0.92666	DEAD	0.00644	0.10736	-20.76913

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
22	1.39000	DEAD	0.00644	0.10736	-13.19357
22	1.85333	DEAD	0.00644	0.10736	-7.21234
22	0.00000	PEATONAL	-0.02111	-0.35189	-0.61666
22	0.46333	PEATONAL	-0.02111	-0.35189	0.31008
22	0.92666	PEATONAL	-0.02111	-0.35189	1.23682
22	1.39000	PEATONAL	-0.02111	-0.35189	2.16356
22	1.85333	PEATONAL	-0.02111	-0.35189	3.09031
22	0.00000	ASFAL-ACCE	0.04886	0.81438	-1.21116
22	0.46333	ASFAL-ACCE	0.04886	0.81438	0.64007
22	0.92666	ASFAL-ACCE	0.04886	0.81438	2.49129
22	1.39000	ASFAL-ACCE	0.04886	0.81438	4.34251
22	1.85333	ASFAL-ACCE	0.04886	0.81438	6.19374
22	0.00000	TEMP	0.00051	0.00857	-28.99593
22	0.46333	TEMP	0.00051	0.00857	-28.44022
22	0.92666	TEMP	0.00051	0.00857	-27.88451
22	1.39000	TEMP	0.00051	0.00857	-27.32880
22	1.85333	TEMP	0.00051	0.00857	-26.77309
23	0.00000	DEAD	0.01070	0.10702	-7.21234
23	0.46481	DEAD	0.01070	0.10702	9.02672
23	0.92961	DEAD	0.01070	0.10702	23.63542
23	1.39442	DEAD	0.01070	0.10702	36.61377
23	1.85923	DEAD	0.01070	0.10702	47.96176
23	0.00000	PEATONAL	-0.03508	-0.35078	3.09031
23	0.46481	PEATONAL	-0.03508	-0.35078	4.63488
23	0.92961	PEATONAL	-0.03508	-0.35078	6.17945
23	1.39442	PEATONAL	-0.03508	-0.35078	7.72402
23	1.85923	PEATONAL	-0.03508	-0.35078	9.26859
23	0.00000	ASFAL-ACCE	0.08118	0.81179	6.19374
23	0.46481	ASFAL-ACCE	0.08118	0.81179	9.27911
23	0.92961	ASFAL-ACCE	0.08118	0.81179	12.36448
23	1.39442	ASFAL-ACCE	0.08118	0.81179	15.44986
23	1.85923	ASFAL-ACCE	0.08118	0.81179	18.53523
23	0.00000	TEMP	0.00085	0.00854	-26.77309
23	0.46481	TEMP	0.00085	0.00854	-25.84690
23	0.92961	TEMP	0.00085	0.00854	-24.92072
23	1.39442	TEMP	0.00085	0.00854	-23.99453
23	1.85923	TEMP	0.00085	0.00854	-23.06835
24	0.00000	DEAD	0.16983	0.10548	53.81300
24	0.46701	DEAD	0.16983	0.07086	46.86804
24	0.93402	DEAD	0.16983	0.03584	38.24990
24	1.40103	DEAD	0.16983	0.00101	27.96456
24	1.86804	DEAD	0.16983	-0.03381	16.01004
24	0.00000	PEATONAL	0.08600	-0.38008	10.04750
24	0.46701	PEATONAL	0.08600	-0.36667	8.37350
24	0.93402	PEATONAL	0.08600	-0.35326	6.69951
24	1.40103	PEATONAL	0.08600	-0.33984	5.02551
24	1.86804	PEATONAL	0.08600	-0.32643	3.35152
24	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.18161	0.88550	20.09515
24	0.46701	ASFAL-ACCE	-0.18161	0.85398	16.74863
24	0.93402	ASFAL-ACCE	-0.18161	0.82246	13.40211
24	1.40103	ASFAL-ACCE	-0.18161	0.79095	10.05559
24	1.86804	ASFAL-ACCE	-0.18161	0.75943	6.70907
24	0.00000	TEMP	-0.02367	-0.01058	-32.35587
24	0.46701	TEMP	-0.02367	-0.00923	-31.56376
24	0.93402	TEMP	-0.02367	-0.00788	-30.77166
24	1.40103	TEMP	-0.02367	-0.00654	-29.97955
24	1.86804	TEMP	-0.02367	-0.00519	-29.18744
25	0.00000	DEAD	0.16838	-0.04040	16.01004
25	0.46993	DEAD	0.16838	-0.07544	14.28690

8. Frame results

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
25	0.93987	DEAD	0.16838	-0.11048	10.85283
25	1.40980	DEAD	0.16838	-0.14552	5.70782
25	1.87973	DEAD	0.16838	-0.18056	-1.14811
25	0.00000	PEATONAL	0.07321	-0.32954	3.35152
25	0.46993	PEATONAL	0.07321	-0.31604	2.30194
25	0.93987	PEATONAL	0.07321	-0.30254	1.25235
25	1.40980	PEATONAL	0.07321	-0.28905	0.20276
25	1.87973	PEATONAL	0.07321	-0.27555	-0.84682
25	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.15187	0.76593	6.70907
25	0.46993	ASFAL-ACCE	-0.15187	0.73422	4.60981
25	0.93987	ASFAL-ACCE	-0.15187	0.70250	2.51054
25	1.40980	ASFAL-ACCE	-0.15187	0.67079	0.41128
25	1.87973	ASFAL-ACCE	-0.15187	0.63907	-1.68799
25	0.00000	TEMP	-0.02385	-0.00426	-29.18744
25	0.46993	TEMP	-0.02385	-0.00290	-28.10281
25	0.93987	TEMP	-0.02385	-0.00154	-27.01817
25	1.40980	TEMP	-0.02385	-0.00019	-25.93354
25	1.87973	TEMP	-0.02385	0.00117	-24.84890
26	0.00000	DEAD	0.16132	-0.18690	-1.14811
26	0.47356	DEAD	0.16132	-0.22221	2.17884
26	0.94712	DEAD	0.16132	-0.25752	3.73960
26	1.42068	DEAD	0.16132	-0.29283	3.53417
26	1.89424	DEAD	0.16132	-0.32814	1.56254
26	0.00000	PEATONAL	0.06256	-0.27816	-0.84682
26	0.47356	PEATONAL	0.06256	-0.26456	-1.27200
26	0.94712	PEATONAL	0.06256	-0.25096	-1.69718
26	1.42068	PEATONAL	0.06256	-0.23736	-2.12235
26	1.89424	PEATONAL	0.06256	-0.22376	-2.54753
26	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.12718	0.64444	-1.68799
26	0.47356	ASFAL-ACCE	-0.12718	0.61248	-2.54001
26	0.94712	ASFAL-ACCE	-0.12718	0.58052	-3.39202
26	1.42068	ASFAL-ACCE	-0.12718	0.54856	-4.24403
26	1.89424	ASFAL-ACCE	-0.12718	0.51660	-5.09605
26	0.00000	TEMP	-0.02379	0.00209	-24.84890
26	0.47356	TEMP	-0.02379	0.00345	-23.47175
26	0.94712	TEMP	-0.02379	0.00482	-22.09459
26	1.42068	TEMP	-0.02379	0.00619	-20.71743
26	1.89424	TEMP	-0.02379	0.00756	-19.34027
27	0.00000	DEAD	0.14879	-0.33400	1.56254
27	0.47788	DEAD	0.14879	-0.36963	9.71691
27	0.95575	DEAD	0.14879	-0.40526	16.04655
27	1.43363	DEAD	0.14879	-0.44089	20.55146
27	1.91151	DEAD	0.14879	-0.47653	23.23165
27	0.00000	PEATONAL	0.05405	-0.22596	-2.54753
27	0.47788	PEATONAL	0.05405	-0.21224	-2.34830
27	0.95575	PEATONAL	0.05405	-0.19851	-2.14907
27	1.43363	PEATONAL	0.05405	-0.18479	-1.94984
27	1.91151	PEATONAL	0.05405	-0.17106	-1.75060
27	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.10756	0.52104	-5.09605
27	0.47788	ASFAL-ACCE	-0.10756	0.48879	-4.70081
27	0.95575	ASFAL-ACCE	-0.10756	0.45654	-4.30557
27	1.43363	ASFAL-ACCE	-0.10756	0.42429	-3.91033
27	1.91151	ASFAL-ACCE	-0.10756	0.39204	-3.51510
27	0.00000	TEMP	-0.02349	0.00845	-19.34027
27	0.47788	TEMP	-0.02349	0.00983	-17.67058
27	0.95575	TEMP	-0.02349	0.01121	-16.00090
27	1.43363	TEMP	-0.02349	0.01259	-14.33122
27	1.91151	TEMP	-0.02349	0.01397	-12.66153
28	0.00000	DEAD	0.13102	-0.48171	23.23165

3. Frame results

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
28	0.48286	DEAD	0.13102	-0.51772	35.97224
28	0.96573	DEAD	0.13102	-0.55372	46.81546
28	1.44859	DEAD	0.13102	-0.58972	55.76131
28	1.93146	DEAD	0.13102	-0.62573	62.80980
28	0.00000	PEATONAL	0.04767	-0.17295	-1.75060
28	0.48286	PEATONAL	0.04767	-0.15908	-0.92697
28	0.96573	PEATONAL	0.04767	-0.14521	-0.10333
28	1.44859	PEATONAL	0.04767	-0.13134	0.72031
28	1.93146	PEATONAL	0.04767	-0.11748	1.54395
28	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.09295	0.39576	-3.51510
28	0.48286	ASFAL-ACCE	-0.09295	0.36317	-1.87261
28	0.96573	ASFAL-ACCE	-0.09295	0.33058	-0.23012
28	1.44859	ASFAL-ACCE	-0.09295	0.29800	1.41237
28	1.93146	ASFAL-ACCE	-0.09295	0.26541	3.05486
28	0.00000	TEMP	-0.02295	0.01483	-12.66153
28	0.48286	TEMP	-0.02295	0.01623	-10.69932
28	0.96573	TEMP	-0.02295	0.01762	-8.73711
28	1.44859	TEMP	-0.02295	0.01902	-6.77490
28	1.93146	TEMP	-0.02295	0.02041	-4.81269
29	0.00000	DEAD	0.10824	-0.63007	62.80980
29	0.48850	DEAD	0.10824	-0.66649	79.84417
29	0.97700	DEAD	0.10824	-0.70291	94.90481
29	1.46550	DEAD	0.10824	-0.73934	107.99170
29	1.95401	DEAD	0.10824	-0.77576	119.10485
29	0.00000	PEATONAL	0.04338	-0.11913	1.54395
29	0.48850	PEATONAL	0.04338	-0.10510	2.99200
29	0.97700	PEATONAL	0.04338	-0.09107	4.44005
29	1.46550	PEATONAL	0.04338	-0.07704	5.88810
29	1.95401	PEATONAL	0.04338	-0.06301	7.33614
29	0.00000	ASFAL-ACCE	-0.08326	0.26861	3.05486
29	0.48850	ASFAL-ACCE	-0.08326	0.23564	5.94460
29	0.97700	ASFAL-ACCE	-0.08326	0.20267	8.83434
29	1.46550	ASFAL-ACCE	-0.08326	0.16970	11.72409
29	1.95401	ASFAL-ACCE	-0.08326	0.13673	14.61383
29	0.00000	TEMP	-0.02220	0.02123	-4.81269
29	0.48850	TEMP	-0.02220	0.02264	-2.55796
29	0.97700	TEMP	-0.02220	0.02405	-0.30323
29	1.46550	TEMP	-0.02220	0.02546	1.95151
29	1.95401	TEMP	-0.02220	0.02688	4.20624
30	0.00000	DEAD	-2.71289	0.28314	130.14167
30	0.49477	DEAD	-2.71289	0.32970	121.39184
30	0.98953	DEAD	-2.71289	0.37626	110.57706
30	1.48430	DEAD	-2.71289	0.42282	97.69731
30	1.97907	DEAD	-2.71289	0.46939	82.75261
30	0.00000	PEATONAL	0.92555	-0.42242	7.98671
30	0.49477	PEATONAL	0.92555	-0.41027	6.18634
30	0.98953	PEATONAL	0.92555	-0.39811	4.38597
30	1.48430	PEATONAL	0.92555	-0.38596	2.58560
30	1.97907	PEATONAL	0.92555	-0.37380	0.78523
30	0.00000	ASFAL-ACCE	-2.14487	0.97898	15.81348
30	0.49477	ASFAL-ACCE	-2.14487	0.95066	12.31864
30	0.98953	ASFAL-ACCE	-2.14487	0.92235	8.72379
30	1.48430	ASFAL-ACCE	-2.14487	0.89403	5.12895
30	1.97907	ASFAL-ACCE	-2.14487	0.86572	1.53410
30	0.00000	TEMP	0.00073	0.01025	-3.75326
30	0.49477	TEMP	0.00073	0.00945	-1.51347
30	0.98953	TEMP	0.00073	0.00866	0.72632
30	1.48430	TEMP	0.00073	0.00787	2.96611
30	1.97907	TEMP	0.00073	0.00708	5.20590

3. Frame results

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T	M2	M3
			Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m
31	0.00000	DEAD	-2.69510	0.56263	82.75261
31	0.40131	DEAD	-2.69510	0.80040	78.86009
31	0.80262	DEAD	-2.69510	0.63817	73.58489
31	1.20393	DEAD	-2.69510	0.67594	66.92700
31	1.60524	DEAD	-2.69510	0.71370	58.88643
31	2.00655	DEAD	-2.69510	0.75147	49.46316
31	0.00000	PEATONAL	0.91211	-0.40549	0.78523
31	0.40131	PEATONAL	0.91211	-0.39563	-0.15303
31	0.80262	PEATONAL	0.91211	-0.38577	-1.09129
31	1.20393	PEATONAL	0.91211	-0.37591	-2.02956
31	1.60524	PEATONAL	0.91211	-0.36606	-2.96782
31	2.00655	PEATONAL	0.91211	-0.35620	-3.90608
31	0.00000	ASFAL-ACCE	-2.11375	0.93915	1.53410
31	0.40131	ASFAL-ACCE	-2.11375	0.91618	-0.33900
31	0.80262	ASFAL-ACCE	-2.11375	0.89321	-2.21209
31	1.20393	ASFAL-ACCE	-2.11375	0.87025	-4.08519
31	1.60524	ASFAL-ACCE	-2.11375	0.84728	-5.95828
31	2.00655	ASFAL-ACCE	-2.11375	0.82431	-7.83138
31	0.00000	TEMP	0.00097	0.00705	5.20590
31	0.40131	TEMP	0.00097	0.00641	7.20019
31	0.80262	TEMP	0.00097	0.00577	9.19447
31	1.20393	TEMP	0.00097	0.00513	11.18876
31	1.60524	TEMP	0.00097	0.00449	13.18305
31	2.00655	TEMP	0.00097	0.00384	15.17733
32	0.00000	DEAD	-2.66841	0.84135	49.46316
32	0.40727	DEAD	-2.66841	0.87968	48.20221
32	0.81454	DEAD	-2.66841	0.91800	45.48740
32	1.22181	DEAD	-2.66841	0.95633	41.31873
32	1.62908	DEAD	-2.66841	0.99466	35.69622
32	2.03635	DEAD	-2.66841	1.03299	28.61985
32	0.00000	PEATONAL	0.89966	-0.38656	-3.90608
32	0.40727	PEATONAL	0.89966	-0.37655	-4.34232
32	0.81454	PEATONAL	0.89966	-0.36655	-4.77855
32	1.22181	PEATONAL	0.89966	-0.35654	-5.21478
32	1.62908	PEATONAL	0.89966	-0.34654	-5.65102
32	2.03635	PEATONAL	0.89966	-0.33653	-6.08725
32	0.00000	ASFAL-ACCE	-2.08494	0.89467	-7.83138
32	0.40727	ASFAL-ACCE	-2.08494	0.87136	-8.70169
32	0.81454	ASFAL-ACCE	-2.08494	0.84806	-9.57201
32	1.22181	ASFAL-ACCE	-2.08494	0.82475	-10.44232
32	1.62908	ASFAL-ACCE	-2.08494	0.80144	-11.31264
32	2.03635	ASFAL-ACCE	-2.08494	0.77813	-12.18295
32	0.00000	TEMP	0.00110	0.00381	15.17733
32	0.40727	TEMP	0.00110	0.00316	17.37408
32	0.81454	TEMP	0.00110	0.00251	19.57082
32	1.22181	TEMP	0.00110	0.00186	21.76756
32	1.62908	TEMP	0.00110	0.00120	23.96430
32	2.03635	TEMP	0.00110	0.00055	26.16104
33	0.00000	DEAD	-2.63342	1.11918	28.61985
33	0.41367	DEAD	-2.63342	1.15811	29.62939
33	0.82735	DEAD	-2.63342	1.19704	29.10345
33	1.24102	DEAD	-2.63342	1.23597	27.04202
33	1.65469	DEAD	-2.63342	1.27490	23.44510
33	2.06836	DEAD	-2.63342	1.31383	18.31289
33	0.00000	PEATONAL	0.88825	-0.36559	-6.08725
33	0.41367	PEATONAL	0.88825	-0.35543	-6.02145
33	0.82735	PEATONAL	0.88825	-0.34527	-5.95565
33	1.24102	PEATONAL	0.88825	-0.33511	-5.88986
33	1.65469	PEATONAL	0.88825	-0.32494	-5.82406

8. Frame results

23 septiembre 2015

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
33	2.06836	PEATONAL	0.88825	-0.31478	-5.75826
33	0.00000	ASFAL-ACCE	-2.05855	0.84549	-12.18295
33	0.41367	ASFAL-ACCE	-2.05855	0.82182	-12.05049
33	0.82735	ASFAL-ACCE	-2.05855	0.79814	-11.91802
33	1.24102	ASFAL-ACCE	-2.05855	0.77447	-11.78555
33	1.65469	ASFAL-ACCE	-2.05855	0.75079	-11.65309
33	2.06836	ASFAL-ACCE	-2.05855	0.72712	-11.52062
33	0.00000	TEMP	0.00112	0.00052	26.16104
33	0.41367	TEMP	0.00112	-0.00014	28.56024
33	0.82735	TEMP	0.00112	-0.00080	30.95943
33	1.24102	TEMP	0.00112	-0.00147	33.35863
33	1.65469	TEMP	0.00112	-0.00213	35.75783
33	2.06836	TEMP	0.00112	-0.00279	38.15702
34	0.00000	DEAD	-2.59076	1.39608	18.31269
34	0.42050	DEAD	-2.59076	1.43566	21.17536
34	0.84100	DEAD	-2.59076	1.47523	22.40253
34	1.26150	DEAD	-2.59076	1.51480	21.99419
34	1.68200	DEAD	-2.59076	1.55438	19.95033
34	2.10250	DEAD	-2.59076	1.59395	16.27097
34	0.00000	PEATONAL	0.87790	-0.34259	-5.75826
34	0.42050	PEATONAL	0.87790	-0.33226	-5.19043
34	0.84100	PEATONAL	0.87790	-0.32193	-4.62260
34	1.26150	PEATONAL	0.87790	-0.31160	-4.05477
34	1.68200	PEATONAL	0.87790	-0.30127	-3.48694
34	2.10250	PEATONAL	0.87790	-0.29094	-2.91912
34	0.00000	ASFAL-ACCE	-2.03464	0.79156	-11.52062
34	0.42050	ASFAL-ACCE	-2.03464	0.76750	-10.38538
34	0.84100	ASFAL-ACCE	-2.03464	0.74343	-9.25013
34	1.26150	ASFAL-ACCE	-2.03464	0.71937	-8.11488
34	1.68200	ASFAL-ACCE	-2.03464	0.69530	-6.97964
34	2.10250	ASFAL-ACCE	-2.03464	0.67124	-5.84439
34	0.00000	TEMP	0.00103	-0.00282	38.15702
34	0.42050	TEMP	0.00103	-0.00350	40.75867
34	0.84100	TEMP	0.00103	-0.00417	43.36032
34	1.26150	TEMP	0.00103	-0.00484	45.96198
34	1.68200	TEMP	0.00103	-0.00551	48.56363
34	2.10250	TEMP	0.00103	-0.00618	51.16528
35	0.00000	DEAD	-2.54103	1.67209	16.27097
35	0.42773	DEAD	-2.54103	1.71234	20.48084
35	0.85546	DEAD	-2.54103	1.75260	22.94351
35	1.28319	DEAD	-2.54103	1.79285	23.65899
35	1.71092	DEAD	-2.54103	1.83311	22.62728
35	2.13865	DEAD	-2.54103	1.87336	19.84837
35	0.00000	PEATONAL	0.86864	-0.31753	-2.91912
35	0.42773	PEATONAL	0.86864	-0.30702	-1.84926
35	0.85546	PEATONAL	0.86864	-0.29651	-0.77940
35	1.28319	PEATONAL	0.86864	-0.28601	0.29046
35	1.71092	PEATONAL	0.86864	-0.27550	1.36032
35	2.13865	PEATONAL	0.86864	-0.26499	2.43018
35	0.00000	ASFAL-ACCE	-2.01326	0.73287	-5.84439
35	0.42773	ASFAL-ACCE	-2.01326	0.70840	-3.70636
35	0.85546	ASFAL-ACCE	-2.01326	0.68392	-1.56833
35	1.28319	ASFAL-ACCE	-2.01326	0.65944	0.56969
35	1.71092	ASFAL-ACCE	-2.01326	0.63496	2.70772
35	2.13865	ASFAL-ACCE	-2.01326	0.61048	4.84575
35	0.00000	TEMP	0.00084	-0.00621	51.16528
35	0.42773	TEMP	0.00084	-0.00690	53.96938
35	0.85546	TEMP	0.00084	-0.00758	56.77349
35	1.28319	TEMP	0.00084	-0.00826	59.57759

B. Frame results

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
35	1.71092	TEMP	0.00084	-0.00895	62.38170
35	2.13865	TEMP	0.00084	-0.00983	65.18581
36	0.00000	DEAD	3.01640	-1.49886	26.62890
36	0.43534	DEAD	3.01640	-1.41591	4.09045
36	0.87069	DEAD	3.01640	-1.33296	-20.32881
36	1.30603	DEAD	3.01640	-1.25001	-46.62287
36	1.74138	DEAD	3.01640	-1.16707	-74.79774
36	2.17672	DEAD	3.01640	-1.08412	-104.85141
36	0.00000	PEATONAL	0.57192	-0.12130	2.64357
36	0.43534	PEATONAL	0.57192	-0.11038	1.16817
36	0.87069	PEATONAL	0.57192	-0.09945	-0.30722
36	1.30603	PEATONAL	0.57192	-0.08852	-1.78262
36	1.74138	PEATONAL	0.57192	-0.07759	-3.25802
36	2.17672	PEATONAL	0.57192	-0.06667	-4.73341
36	0.00000	ASFAL-ACCE	-1.33768	0.28558	5.27633
36	0.43534	ASFAL-ACCE	-1.33768	0.28011	2.33300
36	0.87069	ASFAL-ACCE	-1.33768	0.23484	-0.61033
36	1.30603	ASFAL-ACCE	-1.33768	0.20917	-3.55366
36	1.74138	ASFAL-ACCE	-1.33768	0.18370	-6.49699
36	2.17672	ASFAL-ACCE	-1.33768	0.15823	-9.44032
36	0.00000	TEMP	-0.00806	-0.00525	63.08225
36	0.43534	TEMP	-0.00806	-0.00505	66.14462
36	0.87069	TEMP	-0.00806	-0.00485	69.20700
36	1.30603	TEMP	-0.00806	-0.00465	72.26937
36	1.74138	TEMP	-0.00806	-0.00445	75.33174
36	2.17672	TEMP	-0.00806	-0.00425	78.39412
37	0.00000	DEAD	2.98443	-1.16927	-104.85141
37	0.44332	DEAD	2.98443	-1.08480	-127.26811
37	0.88664	DEAD	2.98443	-1.00033	-151.72401
37	1.32996	DEAD	2.98443	-0.91586	-178.21912
37	1.77328	DEAD	2.98443	-0.83139	-206.75343
37	2.21661	DEAD	2.98443	-0.74692	-237.32895
37	0.00000	PEATONAL	0.56979	-0.08287	-4.73341
37	0.44332	PEATONAL	0.56979	-0.07174	-5.70621
37	0.88664	PEATONAL	0.56979	-0.06061	-6.67901
37	1.32996	PEATONAL	0.56979	-0.04948	-7.65181
37	1.77328	PEATONAL	0.56979	-0.03836	-8.62462
37	2.21661	PEATONAL	0.56979	-0.02723	-9.59742
37	0.00000	ASFAL-ACCE	-1.33265	0.19612	-9.44032
37	0.44332	ASFAL-ACCE	-1.33265	0.17019	-11.37972
37	0.88664	ASFAL-ACCE	-1.33265	0.14425	-13.31912
37	1.32996	ASFAL-ACCE	-1.33265	0.11831	-15.25853
37	1.77328	ASFAL-ACCE	-1.33265	0.09238	-17.19793
37	2.21661	ASFAL-ACCE	-1.33265	0.06644	-19.13734
37	0.00000	TEMP	-0.00818	-0.00402	78.39412
37	0.44332	TEMP	-0.00818	-0.00382	81.65402
37	0.88664	TEMP	-0.00818	-0.00362	84.91393
37	1.32996	TEMP	-0.00818	-0.00342	88.17383
37	1.77328	TEMP	-0.00818	-0.00321	91.43373
37	2.21661	TEMP	-0.00818	-0.00301	94.69364
38	0.00000	DEAD	2.96288	-0.82826	-237.32695
38	0.45164	DEAD	2.96288	-0.74221	-260.44305
38	0.90329	DEAD	2.96288	-0.65615	-285.79705
38	1.35493	DEAD	2.96288	-0.57010	-313.38896
38	1.80657	DEAD	2.96288	-0.48404	-343.21877
38	2.25821	DEAD	2.96288	-0.39799	-375.28650
38	0.00000	PEATONAL	0.56884	-0.04280	-9.59742
38	0.45164	PEATONAL	0.56884	-0.03146	-10.06762
38	0.90329	PEATONAL	0.56884	-0.02013	-10.53782

8. Frame results

23 septiembre 2015

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
38	1.35493	PEATONAL	0.56884	-0.00879	-11.00803
38	1.80657	PEATONAL	0.56884	0.00255	-11.47823
38	2.25821	PEATONAL	0.56884	0.01388	-11.94844
38	0.00000	ASFAL-ACCE	-1.33033	0.10286	-19.13734
38	0.45164	ASFAL-ACCE	-1.33033	0.07644	-20.07282
38	0.90329	ASFAL-ACCE	-1.33033	0.05001	-21.00830
38	1.35493	ASFAL-ACCE	-1.33033	0.02359	-21.94378
38	1.80657	ASFAL-ACCE	-1.33033	-0.00283	-22.87926
38	2.25821	ASFAL-ACCE	-1.33033	-0.02926	-23.81474
38	0.00000	TEMP	-0.00826	-0.00279	94.89364
38	0.45164	TEMP	-0.00826	-0.00258	98.15107
38	0.90329	TEMP	-0.00826	-0.00238	101.80850
38	1.35493	TEMP	-0.00826	-0.00217	105.06594
38	1.80657	TEMP	-0.00826	-0.00196	108.52337
38	2.25821	TEMP	-0.00826	-0.00176	111.98080
39	0.00000	DEAD	2.95137	-0.47590	-375.28650
39	0.46029	DEAD	2.95137	-0.38820	-400.13610
39	0.92058	DEAD	2.95137	-0.30049	-427.50352
39	1.38087	DEAD	2.95137	-0.21279	-457.38877
39	1.84116	DEAD	2.95137	-0.12509	-489.79183
39	2.30145	DEAD	2.95137	-0.03739	-524.71272
39	0.00000	PEATONAL	0.56900	-0.00111	-11.94844
39	0.46029	PEATONAL	0.56900	0.01045	-11.91605
39	0.92058	PEATONAL	0.56900	0.02200	-11.88366
39	1.38087	PEATONAL	0.56900	0.03355	-11.85128
39	1.84116	PEATONAL	0.56900	0.04511	-11.81887
39	2.30145	PEATONAL	0.56900	0.05666	-11.78648
39	0.00000	ASFAL-ACCE	-1.33064	0.00580	-23.81474
39	0.46029	ASFAL-ACCE	-1.33064	-0.02113	-23.74630
39	0.92058	ASFAL-ACCE	-1.33064	-0.04806	-23.67785
39	1.38087	ASFAL-ACCE	-1.33064	-0.07499	-23.60941
39	1.84116	ASFAL-ACCE	-1.33064	-0.10192	-23.54096
39	2.30145	ASFAL-ACCE	-1.33064	-0.12885	-23.47252
39	0.00000	TEMP	-0.00830	-0.00154	111.98080
39	0.46029	TEMP	-0.00830	-0.00133	115.63576
39	0.92058	TEMP	-0.00830	-0.00112	119.29073
39	1.38087	TEMP	-0.00830	-0.00091	122.94569
39	1.84116	TEMP	-0.00830	-0.00070	126.80065
39	2.30145	TEMP	-0.00830	-0.00049	130.25561
40	0.00000	DEAD	2.94948	-0.11220	-524.71272
40	0.46924	DEAD	2.94948	-0.02279	-552.75494
40	0.93849	DEAD	2.94948	0.06662	-583.71398
40	1.40773	DEAD	2.94948	0.15602	-617.58985
40	1.87698	DEAD	2.94948	0.24543	-654.38253
40	2.34622	DEAD	2.94948	0.33484	-694.09204
40	0.00000	PEATONAL	0.57026	0.04222	-11.78648
40	0.46924	PEATONAL	0.57026	0.05400	-11.25149
40	0.93849	PEATONAL	0.57026	0.06577	-10.71651
40	1.40773	PEATONAL	0.57026	0.07755	-10.18152
40	1.87698	PEATONAL	0.57026	0.08933	-9.64653
40	2.34622	PEATONAL	0.57026	0.10111	-9.11154
40	0.00000	ASFAL-ACCE	-1.33348	-0.09507	-23.47252
40	0.46924	ASFAL-ACCE	-1.33348	-0.12253	-22.40015
40	0.93849	ASFAL-ACCE	-1.33348	-0.14998	-21.32778
40	1.40773	ASFAL-ACCE	-1.33348	-0.17743	-20.25541
40	1.87698	ASFAL-ACCE	-1.33348	-0.20489	-19.18304
40	2.34622	ASFAL-ACCE	-1.33348	-0.23234	-18.11067
40	0.00000	TEMP	-0.00831	-0.00028	130.25561
40	0.46924	TEMP	-0.00831	-6.293E-05	134.10811

Table 16: Element Forces - Frames, Part 2 of 2

Frame	Station m	OutputCase	T Tonf-m	M2 Tonf-m	M3 Tonf-m
40	0.93849	TEMP	-0.00831	0.00015	137.96060
40	1.40773	TEMP	-0.00831	0.00037	141.81309
40	1.87698	TEMP	-0.00831	0.00058	145.66558
40	2.34622	TEMP	-0.00831	0.00079	149.51807

9. Area results

This section provides area results, including items such as forces and stresses.

10. Material take-off

This section provides a material take-off.

Table 17: Material List 2 - By Section Property

Table 17: Material List 2 - By Section Property

Section	ObjectType	NumPieces	TotalLength m	TotalWeight Tonf
Vvarc-01	Frame	4	9.38488	157.6660
Vvarc-02	Frame	4	9.20579	136.0984
Vvarc-03	Frame	4	9.03285	120.9679
Vvarc-04	Frame	4	8.86642	110.2274
Vvarc-05	Frame	4	8.70888	101.5570
Vvarc-06	Frame	4	8.55460	94.4428
Vvarc-07	Frame	4	8.41000	88.4059
Vvarc-08	Frame	4	8.27345	82.9993
Vvarc-09	Frame	4	8.14538	78.5866
Vvarc-10	Frame	4	8.02619	74.7398
Vvarc-11	Frame	4	7.91627	71.4364
Vvarc-12	Frame	4	7.81603	68.2808
Vvarc-13	Frame	4	7.72583	65.6386
Vvarc-14	Frame	4	7.64603	63.1256
Vvarc-15	Frame	4	7.57696	61.1006
Vvarc-16	Frame	4	7.51892	59.1890
Vvarc-17	Frame	4	7.47217	57.7449
Vvarc-18	Frame	4	7.43691	56.4015
Vvarc-19	Frame	4	7.41331	55.1550
Vvarc-20	Frame	4	7.40148	54.0012

11. Design preferences

This section provides the design preferences for each type of design, which typically include material reduction factors, framing type, stress ratio limit, deflection limits, and other code specific items.

11.1. Steel design

Table 18: Preferences - Steel Design - AISC-LRFD93, Part 1 of 2

Table 18: Preferences - Steel Design - AISC-LRFD93, Part 1 of 2

FrameType	PatLLF	SRatioLimit	PhiB	PhiC	PhiT	PhiV	PhiCA
Moment Frame	0.750000	0.950000	0.900000	0.850000	0.900000	0.900000	0.900000

Table 18: Preferences - Steel Design - AISC-LRFD93, Part 2 of 2

Table 18: Preferences - Steel Design - AISC-LRFD93, Part 2 of 2

DLRat	SDLAndLLRat	LLRat	TotalRat	NetRat
120.000000	120.000000	360.000000	240.000000	240.000000

11.2. Concrete design

Table 19: Preferences - Concrete Design - ACI 318-05/IBC2003, Part 1 of 2

Table 19: Preferences - Concrete Design - ACI 318-05/IBC2003, Part 1 of 2

MinEccen	PatLLF	UFLimit	SelsCat	PhiT
No	0.750000	0.950000	D	0.900000

Table 19: Preferences - Concrete Design - ACI 318-05/IBC2003, Part 2 of 2

Table 19: Preferences - Concrete Design - ACI 318-05/IBC2003, Part 2 of 2

PhiCTIed	PhiCSpiral	PhiV	PhiVSeismi c	PhiVJoint
0.650000	0.700000	0.750000	0.600000	0.850000

11.3. Aluminum design

Table 20: Preferences - Aluminum Design - AA-ASD 2000

Table 20: Preferences - Aluminum Design - AA-ASD 2000

FrameType	SRatioLimit	LatFact	UseLatFact
Moment Frame	1.000000	1.333333	No

11.4. Cold formed design

Table 21: Preferences - Cold Formed Design - AISI-ASD96

Table 21: Preferences - Cold Formed Design - AISI-ASD96

FrameType	SRatioLimit	OmegaBS	OmegaBUS	OmegaBLTB	OmegaVS	OmegaVNS	OmegaT	OmegaC
Braced Frame	1.000000	1.670000	1.670000	1.670000	1.670000	1.500000	1.670000	1.800000

ANEXO 11

REPORTE DE DESPLAZAMIENTOS CON EL DISEÑO FINAL DEL SQP PARA LA VIGA EN ARCO DEL PUENTE DE CONCRETO ARMADO

(Modulo CSI BRIDGE - SAP 2000)

List of Tables

Table: <u>Joint Displacements Part 1 of 1</u>	2
---	---

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1								
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2
				m	m	m	Radians	Radians
1	DEAD	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	PEATONAL	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	TEMP	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	RESIS-01	Combination	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	RESIS-01	Combination	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	DEAD	LinStatic		0.000044	-9.885E-07	-0.000301	-2.228E-06	0.000187
2	PEATONAL	LinStatic		-6.204E-06	1.209E-08	-8.538E-06	-2.083E-07	3.430E-06
2	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000012	-2.726E-08	-0.000017	4.919E-07	6.814E-06
2	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	TEMP	LinStatic		0.000071	2.241E-09	0.000096	-1.018E-13	-0.000025
2	RESIS-01	Combination	Max	0.000111	-1.253E-06	-0.000301	-2.411E-06	0.000220
2	RESIS-01	Combination	Min	0.000111	-1.253E-06	-0.000301	-2.411E-06	0.000220
3	DEAD	LinStatic		0.000311	-2.642E-06	-0.000914	-5.054E-06	0.000340
3	PEATONAL	LinStatic		-6.795E-06	7.932E-09	-0.000025	-4.214E-07	6.053E-06
3	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000014	-1.743E-08	-0.000050	9.964E-07	0.000016
3	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	TEMP	LinStatic		0.000110	8.279E-09	0.000233	2.525E-10	-0.000048
3	RESIS-01	Combination	Max	0.000488	-3.305E-06	-0.000983	-5.560E-06	0.000406
3	RESIS-01	Combination	Min	0.000488	-3.305E-06	-0.000983	-5.560E-06	0.000406
4	DEAD	LinStatic		0.000728	-3.561E-06	-0.001775	-8.521E-06	0.000454
4	PEATONAL	LinStatic		-1.520E-06	-6.460E-08	-0.000051	-6.428E-07	0.000013
4	ASFAL-ACC E	LinStatic		-3.254E-06	1.482E-07	-0.000102	1.522E-06	0.000026
4	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	TEMP	LinStatic		0.000122	1.740E-08	0.000409	7.675E-10	-0.000071
4	RESIS-01	Combination	Max	0.001049	-4.321E-06	-0.001973	-9.493E-06	0.000544
4	RESIS-01	Combination	Min	0.001049	-4.321E-06	-0.001973	-9.493E-06	0.000544
5	DEAD	LinStatic		0.001220	-2.382E-06	-0.002803	-0.000013	0.000518
5	PEATONAL	LinStatic		8.167E-06	-2.598E-07	-0.000086	-8.786E-07	0.000016
5	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000016	5.935E-07	-0.000172	2.082E-06	0.000033
5	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	TEMP	LinStatic		0.000111	2.893E-08	0.000622	1.571E-09	-0.000093
5	RESIS-01	Combination	Max	0.001696	-2.507E-06	-0.003166	-0.000014	0.000613
5	RESIS-01	Combination	Min	0.001696	-2.507E-06	-0.003166	-0.000014	0.000613
6	DEAD	LinStatic		0.001703	2.251E-06	-0.003885	-0.000018	0.000508
6	PEATONAL	LinStatic		0.000019	-6.357E-07	-0.000126	-1.134E-06	0.000016
6	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000037	1.451E-06	-0.000250	2.689E-06	0.000032
6	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	TEMP	LinStatic		0.000081	4.224E-08	0.000873	2.689E-09	-0.000114
6	RESIS-01	Combination	Max	0.002314	3.928E-06	-0.004404	-0.000020	0.000574
6	RESIS-01	Combination	Min	0.002314	3.928E-06	-0.004404	-0.000020	0.000574
7	DEAD	LinStatic		0.002085	6.963E-06	-0.004853	-0.000014	0.000483
7	PEATONAL	LinStatic		0.000024	-9.908E-07	-0.000157	-1.993E-06	0.000015
7	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000048	2.260E-06	-0.000313	4.687E-06	0.000030

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians
7	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	TEMP	LinStatic		0.000035	6.298E-08	0.001159	-1.109E-08	-0.000136
7	RESIS-01	Combination	Max	0.002763	0.000010	-0.005420	-0.000014	0.000488
7	RESIS-01	Combination	Min	0.002763	0.000010	-0.005420	-0.000014	0.000488
8	DEAD	LinStatic		0.002382	7.652E-06	-0.005745	-0.000010	0.000424
8	PEATONAL	LinStatic		0.000030	-1.036E-06	-0.000193	-3.000E-06	0.000019
8	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000060	2.355E-06	-0.000385	7.028E-06	0.000038
8	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	TEMP	LinStatic		-0.000023	9.587E-08	0.001483	-2.648E-08	-0.000157
8	RESIS-01	Combination	Max	0.003092	0.000011	-0.006317	-7.531E-06	0.000433
8	RESIS-01	Combination	Min	0.003092	0.000011	-0.006317	-7.531E-06	0.000433
9	DEAD	LinStatic		0.002603	4.905E-06	-0.006569	-5.809E-06	0.000384
9	PEATONAL	LinStatic		0.000040	-7.393E-07	-0.000241	-4.171E-06	0.000027
9	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000079	1.663E-06	-0.000480	9.750E-06	0.000053
9	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	TEMP	LinStatic		-0.000089	1.390E-07	0.001839	-4.368E-08	-0.000176
9	RESIS-01	Combination	Max	0.003336	7.498E-06	-0.007146	1.214E-08	0.000396
9	RESIS-01	Combination	Min	0.003336	7.498E-06	-0.007146	1.214E-08	0.000396
10	DEAD	LinStatic		0.002743	-8.238E-07	-0.007306	-7.856E-07	0.000322
10	PEATONAL	LinStatic		0.000055	-7.841E-08	-0.000305	-5.546E-06	0.000035
10	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000109	1.253E-07	-0.000608	0.000013	0.000070
10	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	TEMP	LinStatic		-0.000157	1.902E-07	0.002223	-6.326E-08	-0.000190
10	RESIS-01	Combination	Max	0.003501	-5.007E-07	-0.007913	8.656E-06	0.000340
10	RESIS-01	Combination	Min	0.003501	-5.007E-07	-0.007913	8.656E-06	0.000340
11	DEAD	LinStatic		0.002780	-8.201E-06	-0.007888	5.021E-06	0.000202
11	PEATONAL	LinStatic		0.000072	9.636E-07	-0.000382	-7.177E-06	0.000038
11	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000142	-2.298E-06	-0.000762	0.000017	0.000075
11	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	TEMP	LinStatic		-0.000220	2.471E-07	0.002624	-8.592E-08	-0.000199
11	RESIS-01	Combination	Max	0.003550	-0.000012	-0.008522	0.000019	0.000193
11	RESIS-01	Combination	Min	0.003550	-0.000012	-0.008522	0.000019	0.000193
12	DEAD	LinStatic		0.002666	-0.000017	-0.008151	0.000012	-0.000038
12	PEATONAL	LinStatic		0.000082	2.384E-06	-0.000453	-9.062E-06	0.000025
12	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000163	-5.603E-06	-0.000902	0.000021	0.000051
12	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	TEMP	LinStatic		-0.000271	3.069E-07	0.003029	-1.116E-07	-0.000198
12	RESIS-01	Combination	Max	0.003396	-0.000025	-0.008700	0.000030	-0.000165
12	RESIS-01	Combination	Min	0.003396	-0.000025	-0.008700	0.000030	-0.000165
13	DEAD	LinStatic		0.002362	-0.000024	-0.007878	0.000011	-0.000260
13	PEATONAL	LinStatic		0.000078	3.640E-06	-0.000486	-8.827E-06	0.000012
13	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000155	-8.509E-06	-0.000969	0.000021	0.000025
13	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	TEMP	LinStatic		-0.000313	3.317E-07	0.003442	-5.229E-08	-0.000211
13	RESIS-01	Combination	Max	0.002946	-0.000037	-0.008020	0.000029	-0.000519
13	RESIS-01	Combination	Min	0.002946	-0.000037	-0.008020	0.000029	-0.000519
14	DEAD	LinStatic		0.001985	-0.000029	-0.007343	9.811E-06	-0.000333

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians
14	PEATONAL	LinStatic		0.000070	4.324E-06	-0.000511	-8.584E-06	0.000015
14	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000139	-0.000010	-0.001020	0.000020	0.000030
14	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	TEMP	LinStatic		-0.000343	3.072E-07	0.003861	1.091E-08	-0.000210
14	RESIS-01	Combination	Max	0.002401	-0.000044	-0.006970	0.000027	-0.000595
14	RESIS-01	Combination	Min	0.002401	-0.000044	-0.006970	0.000027	-0.000595
15	DEAD	LinStatic		0.001622	-0.000032	-0.006795	8.877E-06	-0.000291
15	PEATONAL	LinStatic		0.000065	4.571E-06	-0.000553	-8.335E-06	0.000027
15	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000128	-0.000011	-0.001105	0.000019	0.000055
15	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	TEMP	LinStatic		-0.000353	2.558E-07	0.004262	7.799E-08	-0.000194
15	RESIS-01	Combination	Max	0.001910	-0.000048	-0.006005	0.000025	-0.000467
15	RESIS-01	Combination	Min	0.001910	-0.000048	-0.006005	0.000025	-0.000467
16	DEAD	LinStatic		0.001311	-0.000033	-0.006384	7.930E-06	-0.000205
16	PEATONAL	LinStatic		0.000063	4.520E-06	-0.000620	-8.090E-06	0.000039
16	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000125	-0.000010	-0.001239	0.000019	0.000078
16	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	TEMP	LinStatic		-0.000339	2.015E-07	0.004617	1.470E-07	-0.000166
16	RESIS-01	Combination	Max	0.001529	-0.000049	-0.005384	0.000024	-0.000270
16	RESIS-01	Combination	Min	0.001529	-0.000049	-0.005384	0.000024	-0.000270
17	DEAD	LinStatic		0.001039	-0.000034	-0.006109	6.984E-06	-0.000169
17	PEATONAL	LinStatic		0.000061	4.309E-06	-0.000699	-7.855E-06	0.000037
17	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000121	-9.875E-06	-0.001397	0.000018	0.000074
17	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	TEMP	LinStatic		-0.000300	1.685E-07	0.004905	2.167E-07	-0.000125
17	RESIS-01	Combination	Max	0.001227	-0.000049	-0.005069	0.000022	-0.000187
17	RESIS-01	Combination	Min	0.001227	-0.000049	-0.005069	0.000022	-0.000187
18	DEAD	LinStatic		0.000773	-0.000033	-0.005777	6.058E-06	-0.000290
18	PEATONAL	LinStatic		0.000052	4.069E-06	-0.000752	-7.636E-06	7.623E-06
18	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000103	-9.316E-06	-0.001504	0.000017	0.000015
18	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	TEMP	LinStatic		-0.000238	1.812E-07	0.005105	2.857E-07	-0.000077
18	RESIS-01	Combination	Max	0.000925	-0.000048	-0.004666	0.000021	-0.000418
18	RESIS-01	Combination	Min	0.000925	-0.000048	-0.004666	0.000021	-0.000418
19	DEAD	LinStatic		0.000488	-0.000033	-0.005089	6.026E-06	-0.000390
19	PEATONAL	LinStatic		0.000034	3.900E-06	-0.000736	-7.598E-06	-0.000017
19	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000069	-8.944E-06	-0.001472	0.000017	-0.000033
19	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	TEMP	LinStatic		-0.000165	2.208E-07	0.005244	2.835E-07	-0.000081
19	RESIS-01	Combination	Max	0.000575	-0.000048	-0.003564	0.000021	-0.000638
19	RESIS-01	Combination	Min	0.000575	-0.000048	-0.003564	0.000021	-0.000638
20	DEAD	LinStatic		0.000230	-0.000033	-0.004447	6.006E-06	-0.000264
20	PEATONAL	LinStatic		0.000017	3.788E-06	-0.000701	-7.574E-06	-0.000016
20	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000033	-8.695E-06	-0.001404	0.000017	-0.000031
20	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	TEMP	LinStatic		-0.000085	2.452E-07	0.005339	2.821E-07	-0.000034

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2
				m	m	m	Radians	Radians
20	RESIS-01	Combination	Max	0.000265	-0.000047	-0.002484	0.000021	-0.000444
20	RESIS-01	Combination	Min	0.000265	-0.000047	-0.002484	0.000021	*-0.000444
21	DEAD	LinStatic		5.301E-17	-0.000033	-0.004189	5.998E-06	-3.677E-17
21	PEATONAL	LinStatic		1.035E-17	3.747E-06	-0.000685	-7.565E-06	-5.463E-18
21	ASFAL-ACC E	LinStatic		2.349E-17	-8.605E-06	-0.001372	0.000017	-1.344E-17
21	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	TEMP	LinStatic		-5.555E-17	2.535E-07	0.005373	2.815E-07	3.110E-17
21	RESIS-01	Combination	Max	5.296E-17	-0.000047	-0.002045	0.000021	-3.836E-17
21	RESIS-01	Combination	Min	5.296E-17	-0.000047	-0.002045	0.000021	-3.836E-17
22	DEAD	LinStatic		-0.000230	-0.000033	-0.004447	6.006E-06	0.000264
22	PEATONAL	LinStatic		-0.000017	3.788E-06	-0.000701	-7.574E-06	0.000016
22	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000033	-8.695E-06	-0.001404	0.000017	0.000031
22	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	TEMP	LinStatic		0.000085	2.452E-07	0.005339	2.821E-07	0.000034
22	RESIS-01	Combination	Max	-0.000265	-0.000047	-0.002484	0.000021	0.000444
22	RESIS-01	Combination	Min	-0.000265	-0.000047	-0.002484	0.000021	0.000444
23	DEAD	LinStatic		-0.000488	-0.000033	-0.005089	6.026E-06	0.000390
23	PEATONAL	LinStatic		-0.000034	3.900E-06	-0.000736	-7.598E-06	0.000017
23	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000069	-8.944E-06	-0.001472	0.000017	0.000033
23	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	TEMP	LinStatic		0.000165	2.208E-07	0.005244	2.835E-07	0.000061
23	RESIS-01	Combination	Max	-0.000575	-0.000048	-0.003564	0.000021	0.000638
23	RESIS-01	Combination	Min	-0.000575	-0.000048	-0.003564	0.000021	0.000638
24	DEAD	LinStatic		-0.000773	-0.000033	-0.005777	6.058E-06	0.000290
24	PEATONAL	LinStatic		-0.000052	4.069E-06	-0.000752	-7.636E-06	-7.623E-06
24	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000103	-9.316E-06	-0.001504	0.000017	-0.000015
24	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	TEMP	LinStatic		0.000238	1.812E-07	0.005105	2.857E-07	0.000077
24	RESIS-01	Combination	Max	-0.000925	-0.000048	-0.004666	0.000021	0.000418
24	RESIS-01	Combination	Min	-0.000925	-0.000048	-0.004666	0.000021	0.000418
25	DEAD	LinStatic		-0.001039	-0.000034	-0.006109	6.984E-06	0.000169
25	PEATONAL	LinStatic		-0.000061	4.309E-06	-0.000699	-7.855E-06	-0.000037
25	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000121	-9.875E-06	-0.001397	0.000018	-0.000074
25	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	TEMP	LinStatic		0.000300	1.685E-07	0.004905	2.167E-07	0.000125
25	RESIS-01	Combination	Max	-0.001227	-0.000049	-0.005069	0.000022	0.000187
25	RESIS-01	Combination	Min	-0.001227	-0.000049	-0.005069	0.000022	0.000187
26	DEAD	LinStatic		-0.001311	-0.000033	-0.006384	7.930E-06	0.000205
26	PEATONAL	LinStatic		-0.000063	4.520E-06	-0.000620	-8.090E-06	-0.000039
26	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000125	-0.000010	-0.001239	0.000019	-0.000078
26	MOVE-01	LinMoving	Max		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	TEMP	LinStatic		0.000339	2.015E-07	0.004617	1.470E-07	0.000166
26	RESIS-01	Combination	Max	-0.001529	-0.000049	-0.005384	0.000024	0.000270
26	RESIS-01	Combination	Min	-0.001529	-0.000049	-0.005384	0.000024	0.000270
27	DEAD	LinStatic		-0.001622	-0.000032	-0.006795	8.877E-06	0.000291
27	PEATONAL	LinStatic		-0.000065	4.571E-06	-0.000553	-8.335E-06	-0.000027
27	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000128	-0.000011	-0.001105	0.000019	-0.000055

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	R1	R2
				m	m	m	Radians	Radians
27	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
27	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
27	TEMP	LinStatic		0.000353	2.558E-07	0.004262	7.799E-08	0.000194
27	RESIS-01	Combination	Max	-0.001910	-0.000048	-0.006005	0.000025	0.000467
27	RESIS-01	Combination	Min	-0.001910	-0.000048	-0.006005	0.000025	0.000467
28	DEAD	LinStatic		-0.001985	-0.000029	-0.007343	9.811E-06	0.000333
28	PEATONAL	LinStatic		-0.000070	4.324E-06	-0.000511	-8.584E-06	-0.000015
28	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000139	-0.000010	-0.001020	0.000020	-0.000030
28	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
28	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
28	TEMP	LinStatic		0.000343	3.072E-07	0.003861	1.091E-08	0.000210
28	RESIS-01	Combination	Max	-0.002401	-0.000044	-0.006970	0.000027	0.000595
28	RESIS-01	Combination	Min	-0.002401	-0.000044	-0.006970	0.000027	0.000595
29	DEAD	LinStatic		-0.002362	-0.000024	-0.007878	0.000011	0.000260
29	PEATONAL	LinStatic		-0.000078	3.640E-06	-0.000486	-8.827E-06	-0.000012
29	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000155	-8.509E-06	-0.000969	0.000021	-0.000025
29	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
29	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
29	TEMP	LinStatic		0.000313	3.317E-07	0.003442	-5.229E-08	0.000211
29	RESIS-01	Combination	Max	-0.002946	-0.000037	-0.008020	0.000029	0.000519
29	RESIS-01	Combination	Min	-0.002946	-0.000037	-0.008020	0.000029	0.000519
30	DEAD	LinStatic		-0.002666	-0.000017	-0.008151	0.000012	0.000038
30	PEATONAL	LinStatic		-0.000082	2.384E-06	-0.000453	-9.062E-06	-0.000025
30	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000163	-5.603E-06	-0.000902	0.000021	-0.000051
30	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
30	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
30	TEMP	LinStatic		0.000271	3.069E-07	0.003029	-1.116E-07	0.000198
30	RESIS-01	Combination	Max	-0.003396	-0.000025	-0.008700	0.000030	0.000165
30	RESIS-01	Combination	Min	-0.003396	-0.000025	-0.008700	0.000030	0.000165
31	DEAD	LinStatic		-0.002780	-8.201E-06	-0.007888	5.021E-06	-0.000202
31	PEATONAL	LinStatic		-0.000072	9.636E-07	-0.000382	-7.177E-06	-0.000038
31	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000142	-2.298E-06	-0.000762	0.000017	-0.000075
31	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
31	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
31	TEMP	LinStatic		0.000220	2.471E-07	0.002624	-8.592E-08	0.000199
31	RESIS-01	Combination	Max	-0.003550	-0.000012	-0.008522	0.000019	-0.000193
31	RESIS-01	Combination	Min	-0.003550	-0.000012	-0.008522	0.000019	-0.000193
32	DEAD	LinStatic		-0.002743	-6.238E-07	-0.007306	-7.856E-07	-0.000322
32	PEATONAL	LinStatic		-0.000055	-7.841E-08	-0.000305	-5.546E-06	-0.000035
32	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000109	1.253E-07	-0.000608	0.000013	-0.000070
32	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
32	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
32	TEMP	LinStatic		0.000157	1.902E-07	0.002223	-6.326E-08	0.000190
32	RESIS-01	Combination	Max	-0.003501	-5.007E-07	-0.007913	8.656E-06	-0.000340
32	RESIS-01	Combination	Min	-0.003501	-5.007E-07	-0.007913	8.656E-06	-0.000340
33	DEAD	LinStatic		-0.002603	4.905E-06	-0.006569	-5.809E-06	-0.000384
33	PEATONAL	LinStatic		-0.000040	-7.393E-07	-0.000241	-4.171E-06	-0.000027
33	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000079	1.663E-06	-0.000480	9.750E-06	-0.000053
33	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
33	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
33	TEMP	LinStatic		0.000089	1.390E-07	0.001839	-4.368E-08	0.000176
33	RESIS-01	Combination	Max	-0.003336	7.498E-06	-0.007146	1.214E-08	-0.000396
33	RESIS-01	Combination	Min	-0.003336	7.498E-06	-0.007146	1.214E-08	-0.000396
34	DEAD	LinStatic		-0.002382	7.652E-06	-0.005745	-0.000010	-0.000424

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radian	R2 Radian
34	PEATONAL	LinStatic		-0.000030	-1.036E-06	-0.000193	-3.000E-06	-0.000019
34	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000060	2.355E-06	-0.000385	7.028E-06	-0.000038
34	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
34	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
34	TEMP	LinStatic		0.000023	9.587E-08	0.001483	-2.648E-08	0.000157
34	RESIS-01	Combination	Max	-0.003092	0.000011	-0.006317	-7.531E-06	-0.000433
34	RESIS-01	Combination	Min	-0.003092	0.000011	-0.006317	-7.531E-06	-0.000433
35	DEAD	LinStatic		-0.002085	6.963E-06	-0.004853	-0.000014	-0.000463
35	PEATONAL	LinStatic		-0.000024	-9.908E-07	-0.000157	-1.993E-06	-0.000015
35	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000048	2.260E-06	-0.000313	4.687E-06	-0.000030
35	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
35	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
35	TEMP	LinStatic		-0.000035	6.298E-08	0.001159	-1.109E-08	0.000136
35	RESIS-01	Combination	Max	-0.002763	0.000010	-0.005420	-0.000014	-0.000488
35	RESIS-01	Combination	Min	-0.002763	0.000010	-0.005420	-0.000014	-0.000488
36	DEAD	LinStatic		-0.001703	2.251E-06	-0.003865	-0.000018	-0.000508
36	PEATONAL	LinStatic		-0.000019	-6.357E-07	-0.000126	-1.134E-06	-0.000016
36	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000037	1.451E-06	-0.000250	2.689E-06	-0.000032
36	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
36	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
36	TEMP	LinStatic		-0.000081	4.224E-08	0.000873	2.689E-09	0.000114
36	RESIS-01	Combination	Max	-0.002314	3.928E-06	-0.004404	-0.000020	-0.000574
36	RESIS-01	Combination	Min	-0.002314	3.928E-06	-0.004404	-0.000020	-0.000574
37	DEAD	LinStatic		-0.001220	-2.382E-06	-0.002803	-0.000013	-0.000518
37	PEATONAL	LinStatic		-8.167E-06	-2.598E-07	-0.000086	-8.786E-07	-0.000016
37	ASFAL-ACC E	LinStatic		-0.000016	5.935E-07	-0.000172	2.082E-06	-0.000033
37	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
37	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
37	TEMP	LinStatic		-0.000111	2.893E-08	0.000622	1.571E-09	0.000093
37	RESIS-01	Combination	Max	-0.001696	-2.507E-06	-0.003166	-0.000014	-0.000613
37	RESIS-01	Combination	Min	-0.001696	-2.507E-06	-0.003166	-0.000014	-0.000613
38	DEAD	LinStatic		-0.000728	-3.561E-06	-0.001775	-8.521E-06	-0.000454
38	PEATONAL	LinStatic		1.520E-06	-6.460E-08	-0.000051	-6.428E-07	-0.000013
38	ASFAL-ACC E	LinStatic		3.254E-06	1.482E-07	-0.000102	1.522E-06	-0.000026
38	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
38	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
38	TEMP	LinStatic		-0.000122	1.740E-08	0.000409	7.675E-10	0.000071
38	RESIS-01	Combination	Max	-0.001049	-4.321E-06	-0.001973	-9.493E-06	-0.000544
38	RESIS-01	Combination	Min	-0.001049	-4.321E-06	-0.001973	-9.493E-06	-0.000544
39	DEAD	LinStatic		-0.000311	-2.642E-06	-0.000914	-5.054E-06	-0.000340
39	PEATONAL	LinStatic		6.795E-06	7.932E-09	-0.000025	-4.214E-07	-8.053E-06
39	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000014	-1.743E-08	-0.000050	9.964E-07	-0.000016
39	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
39	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
39	TEMP	LinStatic		-0.000110	8.279E-09	0.000233	2.525E-10	0.000048
39	RESIS-01	Combination	Max	-0.000488	-3.305E-06	-0.000983	-5.560E-06	-0.000406
39	RESIS-01	Combination	Min	-0.000488	-3.305E-06	-0.000983	-5.560E-06	-0.000406
40	DEAD	LinStatic		-0.000044	-9.865E-07	-0.000301	-2.228E-06	-0.000187
40	PEATONAL	LinStatic		6.204E-06	1.209E-08	-8.538E-06	-2.083E-07	-3.430E-06
40	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000012	-2.726E-08	-0.000017	4.919E-07	-8.814E-06
40	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
40	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
40	TEMP	LinStatic		-0.000071	2.241E-09	0.000096	-1.018E-13	0.000025

Table: Joint Displacements, Part 1 of 1

Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radlans	R2 Radlans
40	RESIS-01	Combination	Max	-0.000111	-1.253E-06	-0.000301	-2.411E-06	-0.000220
40	RESIS-01	Combination	Min	-0.000111	-1.253E-06	-0.000301	-2.411E-06	-0.000220
41	DEAD	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	PEATONAL	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	ASFAL-ACC E	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	MOVE-01	LinMoving	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	MOVE-01	LinMoving	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	TEMP	LinStatic		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	RESIS-01	Combination	Max	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
41	RESIS-01	Combination	Min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

ANEXO 12
PLANOS Y MAPAS

PROYECTO: INSTALACIÓN DEL PUENTE VEHICULAR ALBERTO BENAVIDES DE LA QUINTANA SOBRE EL RIO ICHU, EN EL BARRIO DE SAN CRISTÓBAL, DISTRITO DE HUANCAMELICA, PROVINCIA DE HUANCAMELICA – HUANCAMELICA



Ubicación del Puente Alberto Benavides de la Quintana

**PROYECTO: INSTALACIÓN DEL PUENTE VEHICULAR ALBERTO BENAVIDES DE LA QUINTANA SOBRE EL RÍO ICHU, EN EL BARRIO DE SAN CRISTÓBAL,
DISTRITO DE HUANCAMELICA, PROVINCIA DE HUANCAMELICA – HUANCAMELICA**



ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO