

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERIA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil



TESIS

**OPTIMIZACION DEL PESO EN RHINOCEROS 3D DE COBERTURAS
METALICAS CONFORMADAS POR ARMADURAS ESPACIALES.**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR LA BACHILLER:
MEDINA MORENO KEYKO MARISOL**

**ASESOR:
ING. MARCOS MENDOZA LINARES**

CAJAMARCA – PERÚ

2021

AGRADECIMIENTO

- En primer lugar y sobre todas las cosas agradezco a Dios por su amor inagotable, por jamás abandonarme y brindarme las fuerzas necesarias para emprender y lograr cada meta en mi vida.
- El camino no ha sido sencillo, pero agradezco infinita a mi familia, en especial a mi madre por su gran apoyo y palabras de aliento en cada momento difícil.
- A mi asesor, Ing. Marcos Mendoza Linares por su apoyo constante en el desarrollo de la investigación.
- A mis amigos, Jhoseph Alejandro Gonzáles Ramírez y Wilinton Felipe Colunche Núñez por compartir sus conocimientos y resolver mis dudas durante el desarrollo de este tema de investigación.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	2
CONTENIDO	3
INDICE DE TABLAS.....	7
INDICE DE FIGURAS.....	10
RESUMEN.....	14
ABSTRACT	15
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Planteamiento del problema:	17
1.2 Formulación del problema:	18
1.3 Hipótesis General	18
1.4 Justificación de la investigación:.....	18
1.5 Objetivos:	19
1.5.1 Objetivo general:	19
1.5.2 Objetivos específicos:	19
1.6 Alcances de la investigación:	19
1.7 Organización del trabajo de investigación:.....	19
CAPITULO II. MARCO TEORICO	20
2.1. Antecedentes teóricos:.....	21
2.1.1. Antecedentes teóricos internacionales:	21
2.1.2. Antecedentes teóricos nacionales:.....	22
2.1.3. Antecedentes teóricos locales:.....	23
2.2. Bases teóricas:.....	24
2.2.1. Tipos de Armaduras	24
2.2.1.1. Armaduras planas o bidimensionales	24

2.2.1.1.1. Generalidades sobre las armaduras:	24
2.2.1.1.2. Tipos de armaduras planas:	24
2.2.1.2. Armaduras espaciales	27
2.2.1.2.1. Predimensionamiento de una armadura espacial o viga de celosía.	27
2.2.2. Materiales para Acero Estructural	29
2.2.3. Soldadura.....	30
2.2.3.1. Tipos de procesos de soldadura.....	30
2.2.3.1.1. Soldadura por resistencia eléctrica (ERW).....	30
2.2.3.1.2. Soldadura por arco sumergido (SAW).	31
2.2.3.2. Soldadura en perfiles tubulares.	32
2.2.4. Proceso de diseño para armaduras metálicas.....	34
2.2.5. Modelado paramétrico.....	35
2.2.5.1. Rhinoceros 3D.....	39
2.2.5.2. Grasshopper.....	40
2.2.6. Simulación estructural: Karamba	41
2.2.7. Optimización estructural:	44
2.2.7.1. Restricciones	45
2.2.7.2. Tipos de optimización estructural:	45
2.2.8. Algoritmos genéticos:	46
2.2.9. Computación evolutiva:	48
2.2.9.1. Galápagos, plug-in de Grasshopper.....	51
2.2.10. Consideraciones de diseño	52
2.2.10.1. Diseño por Resistencia Usando Diseño en Base a Factores de Carga y Resistencia (LRFD).....	53
2.2.10.2. Clasificación de las secciones según pandeo local:.....	54
2.2.10.3. Elementos rígidos:.....	54
2.2.10.4. Diseño de espesor de pared para HSS:.....	56
2.2.10.5. Determinación del área bruta y área neta:.....	56
2.2.10.6. Diseño de miembros a tensión:	57
2.2.10.6.1. Límites de esbeltez:	57
2.2.10.6.2. Resistencia a la tensión:.....	57
2.2.10.7. Área neta efectiva (Ae):	58
2.2.10.8. Diseño de miembros a compresión:	60
2.2.10.8.1. Longitud efectiva:.....	60
2.2.10.8.2. Pandeo flexionante de miembros sin elementos esbeltos:	62
2.2.10.8.3. Miembros con elementos esbeltos:.....	63
2.2.10.9. Deflexión de elementos de armaduras metálicas:	66

2.3. Definición de términos básicos	67
CAPITULO III. MATERIALES Y METODOS	68
3.1. Ubicación geográfica de la investigación:	69
3.2. Época de la investigación:.....	69
3.3. Metodología de la investigación	69
3.3.1. Tipo y diseño de la investigación.	69
3.3.2. Población de estudio.....	70
3.3.3. Muestra.....	70
3.3.4. Unidad de análisis:	70
3.3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:	70
3.3.5.1. Técnicas:.....	70
3.3.5.2. Instrumentos:	70
3.4. Procedimiento de la investigación.....	71
3.4.1. Procedimiento de la programación fuente.....	72
3.4.2. Funcionamiento del Guide	85
3.4.3. Ejemplo aplicativo:	98
3.5. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados:	101
3.5.1. Tratamiento y análisis de datos:	101
3.5.2. Presentación de resultados:	101
3.5.2.1. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 1:.....	101
3.5.2.2. Diseño en SAP 2000 de los arcos de celosía.....	123
3.5.2.3. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 02:.....	133
3.5.2.4. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 03:.....	137
3.5.2.5. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 04:.....	141
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	146
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
5.1. CONCLUSIONES.....	151
5.2. RECOMENDACIONES.....	151
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	152

ANEXOS	157
ANEXO 01: Cálculo de las propiedades de las nuevas secciones circulares, las cuáles fueron tomadas de las secciones transversales huecas de aceros Arequipa y Miromina.....	158
ANEXO 02: Creación del archivo csv con las nuevas secciones circulares.	159
ANEXO 03: Catálogo de propiedades del tubo ASTM A500 de sección circular de aceros Arequipa.....	160
ANEXO 04: Catálogo de propiedades del tubo ASTM A500 de sección circular de aceros Miromina.....	161
ANEXO 05: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 01.....	162
ANEXO 06: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 02.....	163
ANEXO 07: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 03.....	164
ANEXO 08: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 04.....	165

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Relaciones ancho/espesor: Elementos a compresión – Miembros sujetos a compresión axial.	55
Tabla 2.2: Factores de corte diferido para conexiones de miembros a tensión.	59
Tabla 2.3: Tabla de selección para la aplicación de las secciones del capítulo E de la guía AISC 360-2016.	61
Tabla 2.4: Valores aproximados del factor de longitud efectiva (k).	62
Tabla 2.5: Deflexiones máximas para elementos estructurales.	66
Tabla 3.1: Restricciones para un apoyo móvil y fijo.	89
Tabla 3.1: Dimensiones de los campos deportivos modelo.	98
Tabla 3.2: Características de los arcos de celosía que conforman las coberturas metálicas de los campos deportivos modelos.	99
Tabla 3.3: Características de las viguetas que conforman las coberturas metálicas de los campos deportivos modelos.	99
Tabla 3.4: Resultados de diseño de las bridas superiores obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.	104
Tabla 3.5: Resultados de diseño de las diagonales derecha obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.	107
Tabla 3.6: Resultados de diseño de las bridas inferiores obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.	108
Tabla 3.7: Resultados de diseño de las diagonales izquierda obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.	112
Tabla 3.8: Resultados de diseño de los enlaces obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.	114
Tabla 3.9: Secciones transversales obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.	116
Tabla 3.10: Resultados de diseño de las bridas superiores de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.	117
Tabla 3.11: Resultados de diseño de las diagonales derecha de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.	118
Tabla 3.12: Resultados de diseño de las diagonales izquierda de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.	119
Tabla 3.13: Resultados de diseño de las bridas inferiores de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.	120

Tabla 3.14: Resultados de deflexiones en las viguetas obtenidas con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.....	123
Tabla 3.15: Resultados de las secciones transversales en los elementos de las viguetas obtenidas con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.	123
Tabla 3.16: Resultados obtenidos para las bridas superiores con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.	124
Tabla 3.17: Resultados obtenidos para las diagonales derecha con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.	126
Tabla 3.18: Resultados obtenidos para las bridas inferiores con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.	127
Tabla 3.19: Resultados obtenidos para las montantes con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.	129
Tabla 3.20: Resultados obtenidos para las diagonales izquierda con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.	131
Tabla 3.21: Resultados de deflexiones en los arcos de celosía obtenidas con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01....	132
Tabla 3.22: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°01.	133
Tabla 3.23: Resultados de diseño (Fuerzas internas mínimas y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°02....	134
Tabla 3.24: Resultados de diseño (secciones transversales) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°02.....	135
Tabla 3.25: Resultados de diseño (deflexiones límites y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°02....	135
Tabla 3.26: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°02.....	136
Tabla 3.27: Resultados de diseño (Fuerzas internas mínimas y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°03....	138
Tabla 3.28: Resultados de diseño (secciones transversales) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°03.....	139
Tabla 3.29: Resultados de diseño (deflexiones límites y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°03....	139

Tabla 3.30: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°03.....	140
Tabla 3.31: Resultados de diseño (Fuerzas internas mínimas y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°04....	142
Tabla 3.32: Resultados de diseño (secciones transversales) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°04.....	143
Tabla 3.33: Resultados de diseño (deflexiones límites y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°04....	143
Tabla 3.34: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°04.	144
Tabla 3.35: Cuadro con los promedios del tiempo óptimo y porcentaje de peso optimizado del ejemplo aplicativo en el guide desarrollado.	145

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Armadura tipo Warren.	25
Figura 2.2. Armadura tipo Pratt	25
Figura 2.3. Armadura tipo Howe.	26
Figura 2.4. Armadura tipo Fink.....	26
Figura 2.5. Características geométricas de una armadura espacial (Arco de viga de celosía tipo Warren con montantes intercaladas).	28
Figura 2.6. Elementos de una armadura espacial (Arco de viga de celosía Warren con montantes consecutivos).....	28
Figura 2.7: Proceso de soldadura por resistencia.	31
Figura 2.8: Proceso de soldadura por arco sumergido.	32
Figura 2.9. Excentricidades en las uniones de perfiles tubulares	33
Figura 2.10. Interés de búsqueda en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas BIM: Revit, ArchiCAD, Vectorworks.	36
Figura 2.11. Desglose comparativo por región en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas BIM: Revit, ArchiCAD, Vectorworks.	37
Figura 2.12. Interés de búsqueda en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas avanzadas: Digital Projects, Grasshopper 3D, Generative Components.....	37
Figura 2.13. Desglose comparativo por región en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas avanzadas: Digital Projects, Grasshopper 3D, Generative Components.	38
Figura 2.14. Logo Tipo del software Rhinoceros 3D.....	39
Figura 2.15. Logo tipo de Grasshopper.....	40
Figura 2.16. Componente “slider” en Grasshopper.....	40
Figura 2.17. Logo tipo de Karamba 3D.	41
Figura 2.18. Armadura paramétrica.	42
Figura 2.19. Sistemas de gran altura.	43
Figura 2.20. Geometría informada bordes del módulo de escalas por fuerzas internas.	43
Figura 2.21. Tres tipos de optimización estructural.	46
Figura 2.22. Diagrama de un algoritmo genético usado en la optimización.	48
Figura 2.23. Componentes que forman parte de la computación evolutiva.	49
Figura 2.24. Interrelación entre Rhinoceros 3D-Grasshopper-Karamba-Galápagos.	50
Figura 2.25. Logotipo de Galápagos	51
Figura 2.26. Proceso de optimización con la ejecución del algoritmo genético en el plug-in Galápagos.....	52
Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de creación del guide propuesto.	72
Figura 3.4. Código grafico para definir cubierta o membrana de la cobertura metálica.	73

Figura 3.2. Definición de los parámetros de control para el modelamiento de la cobertura metálica.	74
Figura 3.3. Modelación paramétrica de toda la cobertura (arcos de celosía, viguetas y cubierta.	75
Figura 3.5. Código grafico para definir el material de los elementos del arco de celosía y viguetas.	77
Figura 3.6. Código grafico para definir las articulaciones y apoyos	77
Figura 3.7. Componente Scriptable “Combinación de cargas” para el cálculo de la carga última.	78
Figura 3.8. Componente Scriptable para el cálculo de la carga de servicio.	78
Figura 3.9. Código gráfico para el ensamblaje del modelo final.....	78
.....	79
Figura 3.10. Código gráfico para el cálculo de las deflexiones máxima y límite.	79
Figura 3.11. Código gráfico para el cálculo de las fuerzas axiales máximas y mínimas.	79
Figura 3.12. Script “AISC - TENSION - COMPRESION C”	80
Figura 3.13. Script “FILTRO2”.	80
Figura 3.14. Script “FILTRO3”.	81
Figura 3.15. Código gráfico del diseño de cada elemento de los arcos de celosía y viguetas. 81	
Figura 3.16. Código gráfico de la función de optimización y genome con el plugin Galápagos.	82
Figura 3.17. Código gráfico para calcular el peso total de la cobertura metálica.	83
Figura 3.18. Resultado final: Programa ejecutable o guide.	84
Figura 3.19. Diagrama de flujo sobre el funcionamiento del guide desarrollado.	85
Figura 3.20. Panel de control del programa ejecutable o Guide.	86
Figura 3.21. Ventana Slider para el control de parámetros.	87
Figura 3.22. Ventana para el control de parámetros tipo Panel.....	87
Figura 3.23. Comprobaciones a realizar en el programa ejecutable o Guide.	88
Figura 3.24. Definición de articulaciones y apoyos fijos para dos arcos de celosía en el programa ejecutable o Guide.....	89
Figura 3.25. Definición del material de los elementos en el programa ejecutable o Guide.	90
Figura 3.26. Definición de articulaciones, apoyos fijos y material para toda la cobertura en el programa ejecutable o Guide.....	90
Figura 3.27. Secciones transversales de elementos que definen a la cobertura en el programa ejecutable o Guide.....	91
Figura 3.28. Código gráfico para la optimización de tamaño, geometría y cantidad en el programa ejecutable o Guide.....	92
Figura 3.29. Primera ventana emergente del componente Galápagos.....	93

Figura 3.30. Segunda ventana emergente del componente Galápagos.	93
Figura 3.31. Proceso de optimización con el componente Galápagos.	94
Figura 3.32. Visualización previa de los arcos de celosía para la optimización.	95
Figura 3.33. Código grafico en el guide para definir los arcos de celosía.	95
Figura 3.34. Código gráfico en el guide para definir a las viguetas.	96
Figura 3.35. Visualización de los resultados de las deflexiones en arcos y viguetas.	96
Figura 3.36. Visualización de los resultados de las fuerzas axiales actuantes.	97
Figura 3.37. Componentes para la visualización de los resultados adicionales en el entorno de Rhinoceros 3D.	97
Figura 3.38. Visualización del peso total de la cobertura en el guide.	98
Figura 3.39. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°01.	101
Figura 3.40. Arco de viga de celosía definido en modelación paramétrica del Campo deportivo N°01.	102
Figura 3.41. Visualización 3D del arco de viga de celosía definido en modelación paramétrica del Campo deportivo N°01.	102
Figura 3.42. Características geométricas modificadas para los arcos de celosías después de la optimización-Campo deportivo N° 01.	103
Figura 3.43. Características geométricas de la solución óptima final para los arcos de celosía-Campo deportivo N°01.	103
.....	116
Figura 3.44. Características geométricas de la solución óptima final para las viguetas en 3D-Campo deportivo N°01.	116
Figura 3.45. Vigueta tridimensional definido en modelación paramétrica sin optimización del campo deportivo N°01-16 diagonales.	121
.....	121
Figura 3.46. Vigueta tridimensional definido en modelación paramétrica después de la optimización del campo deportivo N°01-10 diagonales.	121
Figura 3.47. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°01- 10 arcos de celosía.	122
Figura 3.48. Cobertura metálica optimizada - Campo deportivo N°01- 09 arcos de celosía.	122
Figura 3.49. Deflexión máxima de arco de celosía (brida superior-nodo central) obtenida en SAP 2000 - Campo deportivo N°01.	132
Figura 3.50. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°02.	133
Figura 3.51. Características geométricas de la cobertura de la solución óptima final - Campo deportivo N°02.	134

Figura 3.52. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°02 – 10 arcos de celosía.....	136
Figura 3.53. Cobertura metálica con optimización - Campo deportivo N°02- 09 arcos de celosía.....	137
Figura 3.54. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°03.....	137
Figura 3.55. Características geométricas de la cobertura de la solución óptima final - Campo deportivo N°03.....	138
Figura 3.56. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°03 – 09 arcos de celosía.....	140
Figura 3.57. Cobertura metálica con optimización - Campo deportivo N°03 – 09 arcos de celosía.....	141
Figura 3.58. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°04.....	141
Figura 3.59. Características geométricas de la cobertura de la solución óptima final - Campo deportivo N°04.....	142
Figura 3.60. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°04.....	144
Figura 3.61. Cobertura metálica con optimización - Campo deportivo N°04.....	145

RESUMEN

En este trabajo de investigación se utilizó un programa de diseño paramétrico avanzado, Rhinoceros 3D, que gracias a la interacción con sus complementos Grasshopper, Karamba y Galápagos permiten la creación de un guide (plantilla de usuario) para lograr optimizar el peso de coberturas metálicas conformadas por armaduras espaciales (arcos y viguetas tridimensionales) bajo la restricción de cumplimiento de la Norma de diseño AISC 360-16. Este guide se desarrolló utilizando un proceso de diseño integral: modelación paramétrica, análisis estructural y optimización. Para el primer proceso se utilizó códigos gráficos para definir los elementos tanto para los arcos de viga de celosía (brida superior, brida inferior, diagonales izquierda y derecha, montantes, enlaces superior o inferior) y para las viguetas (brida superior, brida inferior, diagonales izquierda y derecha). En el segundo proceso se definió el material, articulaciones en nodos, combinación de cargas según el método LRFD, las secciones transversales de cada elemento y por último se realizó la optimización de geometría, tamaño y cantidad en base a las consideraciones de diseño de la Norma, verificando que los ratios de diseño de cada elemento sometido a tracción o compresión sean iguales o menores a 1. Como resultado de todo este proceso, aplicado a cuatro casos modelos de coberturas metálicas de campos deportivos, se encontró que el peso se optimiza en un 23.87% en un tiempo promedio de 125 min.

Palabras clave: armaduras espaciales, Rhinoceros 3D, guide, modelación paramétrica, análisis estructural, optimización, peso.

ABSTRACT

In this research work, an advanced parametric design program was used, Rhinoceros 3D, which, thanks to the interaction with its Grasshopper, Karamba and Galapagos plugins, allows the creation of a guide (user template) to optimize the weight of formed metal covers. by space trusses (arches and three-dimensional joists) under the restriction of compliance with the AISC 360-16 Design Standard. This guide was developed using a comprehensive design process: parametric modeling, structural analysis, and optimization. For the first process, graphic codes were used to define the elements for both the lattice girder arches (upper flange, lower flange, left and right diagonals, uprights, upper or lower links) and for the joists (upper flange, lower flange, left and right diagonals). In the second process, the material, joints in nodes, combination of loads according to the LRFD method, the cross sections of each element were defined and finally the optimization of geometry, size and quantity was carried out based on the design considerations of the Standard. , verifying that the design ratios of each element subjected to traction or compression are equal to or less than 1. As a result of all this process, applied to four cases models of metallic covers of sports fields, it was found that the weight is optimized in a 23.80% in an average time of 125 min.

Keywords: spatial reinforcements, Rhinoceros 3D, guide, parametric modeling, structural analysis, optimization, weight.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema:

La construcción de edificaciones de estructuras de acero, hoy en día son utilizadas en todas partes del mundo, como una alternativa al concreto reforzado, además de la rapidez en su montaje, las estructuras metálicas tienen la ventaja de poder ser reutilizadas (Chávez 2008). Dentro de las aplicaciones de este material están las estructuras de puentes, el armazón de grandes edificios, las coberturas de techo, etc., en éstas últimas sabemos que existen las armaduras planas y las espaciales, en esta tesis se abordará las armaduras espaciales.

En el diseño de una estructura se requiere que los esfuerzos internos producidos por las demandas externas no rebasen los límites de resistencia del material y que a su vez los desplazamientos no sean tan grandes que provoquen inestabilidad en la estructura. El diseñador debe buscar de entre muchas soluciones la mejor, o mejores, que cumplan las condiciones de resistencia y desplazamientos considerando las necesidades de economía, seguridad y factibilidad (Gutiérrez 2010). Normalmente se requiere realizar varios ajustes y correcciones hasta obtener un diseño seguro, es ahí en donde surge un problema, el diseñador tiene múltiples soluciones y requerirá mucho de su experiencia (Ramírez 2014) para elegir la más “óptima”, sin contar la complejidad de la estructura y el tiempo que empleará en el rediseño consecutivo.

Por todo lo mencionado anteriormente es que se requiere un diseño integral de las estructuras conocido como “optimización estructural”, que se ocupa precisamente de encontrar las formas geométricas que resulten más económicas, pero que a la vez sean capaces de resistir los esfuerzos requeridos por nuestro diseño (Coello 1994).

Sánchez (2012) en su investigación doctoral titulada “Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos”, explica que el proceso de optimización, basado en el diseño tradicional, es un proceso iterativo donde poco a poco se va modificando la geometría de las secciones del diseño inicial, realizado generalmente de forma subjetiva, siendo incapaces de abordar espacios de soluciones tan grandes, es allí donde entran los Algoritmos Genéticos, que son base para la computación evolutiva, y son los que proporcionan al diseñador un conjunto de soluciones óptimas, desde el punto de vista del peso de la estructura, que cumpla con los requerimientos de resistencia y rigidez impuestos por éste.

1.2 Formulación del problema:

¿En qué porcentaje se puede optimizar el peso de coberturas metálicas conformadas por armaduras espaciales usando el programa Rhinoceros 3D?

1.3 Hipótesis General

El peso de las armaduras espaciales puede optimizarse en un porcentaje mayor al 20% usando el programa Rhinoceros 3D.

1.4 Justificación de la investigación:

La optimización de estructuras viene siendo un desafío para el diseñador, ya que se requieren estructuras ligeras, de bajo peso, para contrarrestar los efectos del sismo, pero sin afectar la rigidez y que a su vez cumplan con las restricciones de las normas de diseño. Claro está que, al optimizar el peso de una estructura, también reducimos el material a utilizar y, por tanto, disminuimos el costo y cumplimos con otro compromiso social que es el de la mitigación del impacto ambiental reduciendo la extracción y procesamiento de recursos naturales.

Con el paso de los años, poco a poco se está dejando de lado el proceso iterativo de la optimización tradicional y se está dando paso al uso de potentes softwares (basados en la inteligencia artificial), éstos permiten que haya un creciente avance en el diseño óptimo de estructuras, ya que contienen en su paquete algunas de las técnicas más avanzadas de optimización (algoritmos genéticos) que simplifican y agilizan el diseño. Es por ello que en esta tesis se hará uso de uno de estos softwares, Rhinoceros 3D, que con la interacción con otros programas permite al ingeniero lograr un diseño completo: modelación paramétrica, análisis estructural y optimización.

Gracias a las ventajas de Rhinoceros 3D, se creará un guide (plantilla de usuario) para el diseño integral de armaduras metálicas espaciales en cobertura de techos parabólicos y poder así reducir el peso de los mismos. Esperando que este guide se convierta en una herramienta útil para el diseñador ya que le permitirá un ahorro considerable de tiempo y esfuerzo.

1.5 Objetivos:

1.5.1 Objetivo general:

- Optimizar el peso de coberturas metálicas conformadas por armaduras espaciales gracias al desarrollo de un guide en el programa Rhinoceros 3D.

1.5.2 Objetivos específicos:

- Medir el tiempo empleado por el guide, para optimizar el peso de coberturas metálicas.
- Comparar los resultados obtenidos en el programa Karamba con el programa SAP 2000 para la comprobación y veracidad de dichos resultados.

1.6 Alcances de la investigación:

Esta investigación contempla a las coberturas que están conformadas por armaduras espaciales (arcos y viguetas de celosía tridimensionales) y cuyos elementos serán perfiles metálicos tubulares circulares (HSRO).

1.7 Organización del trabajo de investigación:

El trabajo de investigación está estructurado en cinco capítulos como se indica a continuación:

Capítulo I: INTRODUCCIÓN, comprende el planteamiento del problema, formulación, hipótesis, justificación, alcances, objetivos y organización del trabajo de investigación.

Capítulo II: MARCO TEORICO, comprende los antecedentes teóricos, las bases teóricas.

Capítulo III: MATERIALES Y MÉTODOS, comprende la ubicación geográfica y el tiempo en el cual se llevó a cabo la investigación, se explica la metodología empleada, el procedimiento, un análisis y tratamiento de datos y finalmente se presentan los resultados.

Capítulo IV: ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS, comprende la explicación y discusión de los resultados de la investigación, luego de aplicar la metodología propuesta.

Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, como el mismo nombre lo dice, aquí se plasman las conclusiones a las que se ha llegado luego de analizar los resultados de la investigación y en base a los objetivos planteados. También se colocan las recomendaciones para próximas investigaciones.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes teóricos:

2.1.1. Antecedentes teóricos internacionales:

- Kociecki y Hojjat (2013), en su trabajo de investigación titulado “**Algoritmo genético de dos fases para la optimización del tamaño de estructuras de techo de estructura espacial de acero de forma libre**”, presentan un enfoque de diseño basado en algoritmos genéticos para obtener el peso mínimo de estructuras de techo espacial de acero de forma libre que consisten en secciones estructurales huecas rectangulares (HSS) discretas disponibles comercialmente. La nueva metodología se aplica a dos estructuras de techo sujetas al código AISC LRFD y a las cargas de nieve, viento y sísmica ASCE-10. Dichas estructuras son de las trece estaciones de tren que componen el sistema de tránsito de tren ligero de Ottawa (OLRT) que se completará en Ottawa, Canadá, en 2018. Las soluciones óptimas obtenidas usando la nueva metodología resultaron en ahorros de 12% y 7% para los dos ejemplos, mostrando las ventajas del algoritmo de optimización GA de dos fases, las cuales son: a) automatización del proceso de diseño de una estructura complicada y única; b) aliviar al diseñador de días de proceso de diseño iterativo; y c) lograr un diseño más ligero y, por lo tanto, más económico.
- Kociecki y Hojjat (2015), posteriormente a la presentación de su trabajo de investigación mencionado líneas arriba, desarrollan una nueva investigación titulada “**Optimización de la forma de estructuras de techo de estructura espacial de acero de forma libre con geometrías complejas utilizando computación evolutiva**”, extendiendo el algoritmo a la optimización de la topología de las estructuras. El objetivo es lograr eficiencias estructurales adicionales al alterar la geometría de la estructura del techo al tiempo que se optimizan simultáneamente las dimensiones de la sección transversal de la columna y el miembro del techo y la topología del techo. La estética es una consideración importante en las estructuras del tipo considerado en esta investigación. La metodología se aplica a dos estructuras de techo de estructura espacial de acero de forma libre de la vida real. Son dos de las trece estaciones de tren que conforman el sistema de tránsito de tren ligero de Ottawa (OLRT) que se completará en Ottawa, Canadá, en 2018. Se informan eficiencias en el rango de 10-16% para los dos ejemplos.

- Bonelli y Gudiño (2018), en su trabajo de investigación “**Optimización Estructural y Topológica de Armaduras mediante Algoritmos Genéticos**”, utilizan el algoritmo genético CeFeLix aplicándolo a la optimización de peso de una cercha real (tipo Warren) de una nave industrial de la localidad de Rafaela. Para ello utilizaron el proceso de diseño paramétrico recurriendo al software de programación visual Grasshopper que utiliza para su interfaz gráfica el entorno Rhinoceros 3D. A su vez se adaptaron dos plug-in: uno para realizar el cálculo a través del método de los elementos finitos, llamado Karamba 3D, y otro para la optimización a través de AG denominado Galápagos. Llegando a la conclusión que la celosía tipo Howe es la que logra optimizar el peso de la cercha en 14.3 %, respecto a los métodos tradicionales.

2.1.2. Antecedentes teóricos nacionales:

- Machicao (2015), desarrolló una investigación titulada “**Modelo de análisis comparativo para la optimización del diseño de armaduras de techos en la ciudad de Juliaca**”, de tal forma que permita una correcta elección y diseño de armaduras para tener, mejor costo de diseño, un adecuado tiempo del proceso constructivo y resistentes, para ello analiza y realiza las comparaciones de los modelos de cobertura a dos aguas y en arco, compara el metrado de cargas, esfuerzos y deformaciones, tipos de procesos constructivos, evaluación del presupuesto y programación. Concluyendo que los techos más óptimos para Juliaca son: a dos aguas con armaduras tipo PRATT.
- Escobar (2019), en su tesis de pregrado titulada “**Optimización del diseño de estructuras de acero en cobertura mediante el método de algoritmos genéticos**”, desarrolla la programación en el lenguaje fortran y la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) de SAP2000 v.19 utilizando algoritmos genéticos con el objetivo de reducir la cantidad de material y con ellos el costo. Para la inicialización de la optimización se definió la Función Objetivo con 05 variables, las que representan a los cinco tipos de perfiles a analizar: circular, tubular, cuadrado, ángulo e IPN.

Como resultado se obtiene que el perfil tubular es la sección más óptima con respecto a los demás perfiles con una reducción de material de 27.22 %, con un peso representativo de 11,429.10 kg.

- Borda (2020), en su trabajo de investigación “**Programa para optimización en peso de armaduras de acero mediante algoritmos genéticos**”, diseñó un programa de cómputo en MATLAB que optimiza el peso de armaduras, o estructuras articuladas, bidimensionales de acero mediante el método de optimización denominado algoritmo genético. El programa de cómputo consiste en generar variantes o soluciones aleatorias de la geometría de la estructura, modificando las coordenadas de los nudos (optimización topológica) y a la vez seleccionar el tipo de acero a utilizar y los diámetros respectivos. Al aplicarlo en sus ejemplos, se obtiene una reducción del peso entre 6% y 30% con respecto al diseño inicial. Asimismo, demuestra la eficiencia de los perfiles tubulares frente a las barras circulares.

2.1.3. Antecedentes teóricos locales:

- Diaz (2014), en su investigación titulada "**Evaluación y Optimización en el diseño de estructuras metálicas aplicado a cubiertas según las especificaciones AISC- 2010 por el método LRFD**", abordó una metodología confiable de diseño de estructuras típicas de acero aplicada a techos de considerable luz. Lo aplicó a tres sistemas compuestos por elementos espaciales, por tubos HSS y por elementos de alma llena. Evaluó el comportamiento de cada sistema de techo, y la aplicabilidad de cada uno a los distintos rubros de construcción en acero, con lo cual facilitará la elección de formas estructurales. Llegó a la conclusión que El sistema conformado por elementos espaciales de alma abierta es la mejor alternativa de solución óptima, por poseer un buen comportamiento estructural y menor costo de construcción.

- Gonzáles (2018), tal como lo menciona en el título de su investigación desarrolló un **“Diseño integral de armaduras metálicas usando Rhinoceros 3D: modelación paramétrica, simulación estructural y optimización”**. Al aplicar estas tres etapas innovadoras logró obtener una armadura plana optimizada con un peso menor en 28.35% con respecto al peso de una armadura óptima obtenida con el proceso de diseño estructural tradicional de prueba y error usando SAP2000.
- Colunche (2019), en su tesis de investigación **“Optimización del peso de coberturas metálicas paramétricas usando Rhinoceros 3D”**, desarrolló guides (plantillas de usuario) que permiten al diseñador obtener el diseño óptimo (cobertura de menor peso). Su ejemplo aplicativo se basó en armaduras planas, en el cual logró una disminución del peso en promedio del 13.76%. Concluyendo que las guides ahorran tiempo y material.

2.2. Bases teóricas:

2.2.1. Tipos de Armaduras

2.2.1.1. Armaduras planas o bidimensionales

2.2.1.1.1. Generalidades sobre las armaduras:

Cervera y Blanco (2002) manifiestan que es un sistema formado por barras rectas articuladas en sus extremos y arregladas de manera que formen triángulos y dado que los enlaces articulados impiden desplazamientos relativos y no permiten transmitir momentos flectores de unas piezas a otras, es fácil deducir que las barras o elementos de una armadura trabajan básicamente a esfuerzo axial, ya que la única flexión a la que pueden estar sometidas es la debida a las cargas transversales que actúan directamente sobre ellas.

En las armaduras, el material se aprovecha de manera sumamente eficiente, debido a que todos los elementos están sujetos a cargas axiales que son, además uniformes en toda su longitud (ITEA s.f.).

2.2.1.1.2. Tipos de armaduras planas:

Las armaduras más usadas para las cubiertas de techo son las Warren, Pratt, Howe y Fink, las cuales se describen a continuación:

a. Tipo Warren:

Es un sistema de estructura de celosía muy popular. Una de las principales ventajas de una armadura Warren es su capacidad para distribuir la carga de manera uniforme en varios miembros diferentes; sin embargo, esto es generalmente para los casos en que la estructura está sufriendo una carga extendida (una carga distribuida), pero no es adecuado donde la carga se concentra en un solo punto o nodo (Skyciv c2015).

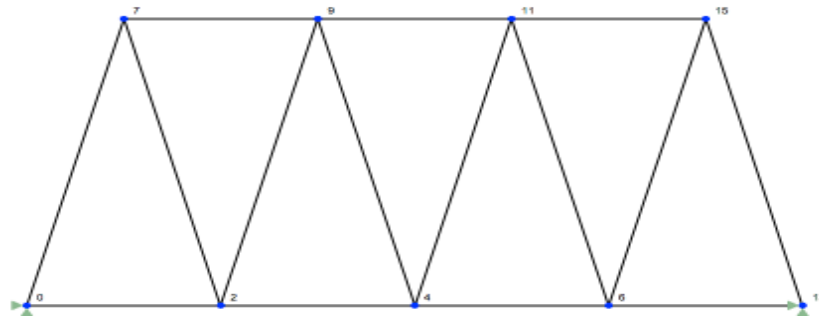


Figura 2.1. Armadura tipo Warren.

Fuente: Tomado de Skyciv c2015.

b. Tipo Pratt:

En una armadura Pratt, los miembros verticales están en compresión., mientras los miembros diagonales están en tensión. Esto simplifica y produce un diseño más eficiente ya que el acero en los miembros diagonales (en tensión) puede ser reducido. Esto tiene algunos efectos: reduce el costo de la estructura debido a miembros más eficientes, reduce el peso propio y facilita la construcción de la estructura. Este tipo de armaduras es el más apropiado para tramos horizontales, donde la fuerza es predominantemente en dirección vertical (Skyciv c2015).

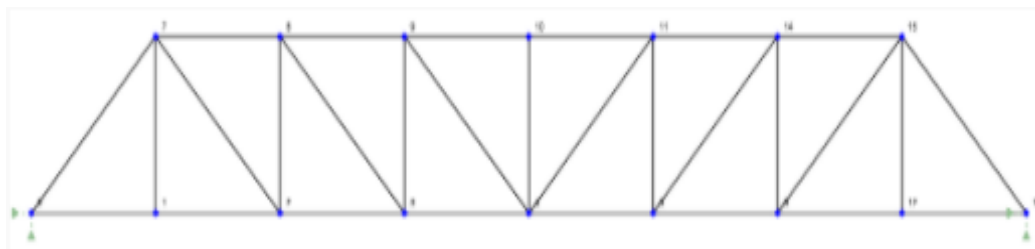


Figura 2.2. Armadura tipo Pratt

Fuente: Tomado de Skyciv c2015.

c. Tipo Howe:

Las armaduras de Howe son esencialmente lo opuesto a las armaduras de Pratt en términos de geometría. La estructura sigue siendo relativamente igual, a excepción que en este caso las diagonales ahora están ocupando las articulaciones opuestas o desocupadas. Este interruptor en posición de los miembros diagonales tiene un efecto estructural muy importante. Para la armadura Howe, lo contrario se vuelve cierto ya que los miembros diagonales ahora están en compresión, mientras que los elementos verticales están en tensión (Skyciv c2015).

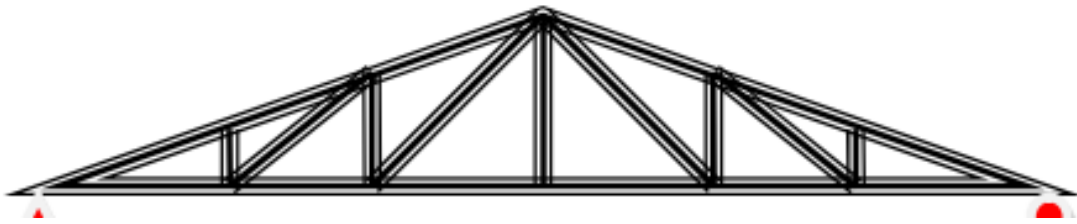


Figura 2.3. Armadura tipo Howe.

Fuente: Tomado de Chávez 2008:34.

d. Tipo Fink:

La cercha Fink en su forma más básica tiene miembros web que siguen un patrón en V que puede repetirse varias veces. Como los acordes superiores se inclinan hacia abajo desde el centro, el patrón V se vuelve notablemente más pequeño. Como las armaduras Fink dependen más de miembros diagonales, pueden ser muy eficientes para transmitir cargas al soporte (Skyciv c2015).

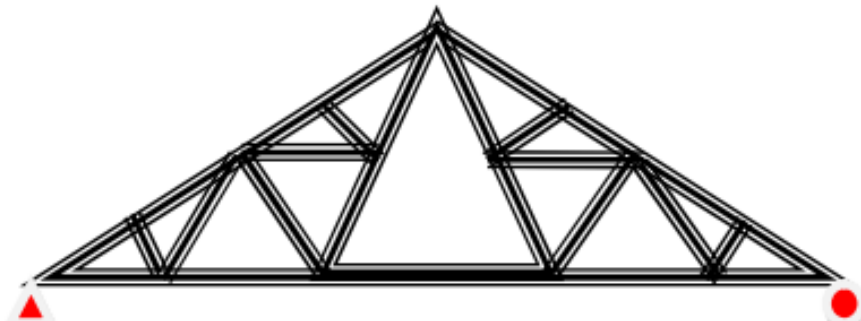


Figura 2.4. Armadura tipo Fink.

Fuente: Tomado de Chávez 2008:35.

2.2.1.2. Armaduras espaciales

También llamadas vigas en celosía multiplano están, en general, representadas por vigas triangulares y cuadrangulares. Son inherentemente estables, es decir, no requieren arriostramientos externos de ninguna clase, y constituyen elementos autónomos para soportar las cargas. Estas vigas ofrecen una resistencia de tipo espacial, lo que significa que pueden soportar cargas y momentos flectores en todas las direcciones (ITEA s.f.: 14-15).

Las barras de las estructuras espaciales se encuentran a menudo en un estado isotrópico en cuanto al pandeo y la capacidad de soportar cargas, las cuales son de tracción o de compresión. Los perfiles tubulares, especialmente los circulares, están extremadamente bien adaptados para realizar estructuras espaciales (ITEA s.f.: 26).

Para poder desarrollar la teoría de diseño de armaduras Ramírez (2014), menciona que se deben considerar las siguientes suposiciones:

- La relación existente entre los esfuerzos y deformaciones es lineal (aplica la Teoría de la Elasticidad).
- Las conexiones entre elementos son consideradas como perfectamente articuladas (libres de fricción).
- El único tipo de fuerzas presente en los elementos esta aplicado a lo largo del eje del mismo, y considerando despreciable su inercia, solo soportan Fuerzas Axiales (Compresión o Tensión).
- No hay efectos de flexión en los elementos, por lo tanto, estos se consideran totalmente rectilíneos.
- Las cargas serán aplicadas únicamente en los nudos de la armadura, el peso propio es considerado mediante el vector de fuerzas de cuerpo.

2.2.1.2.1. Predimensionamiento de una armadura espacial o viga de celosía.

Espejo (1971), nos brinda las siguientes recomendaciones para el caso de arcos metálicos tridimensionales (ver *figura 2.5*).

$$d = 1.5\% *L \quad b = 0.6*d \quad f = L/6$$

Donde:

d = peralte del arco de celosía

b =ancho del arco de celosía

L = longitud horizontal de apoyos del arco

F = flecha del arco de celosía

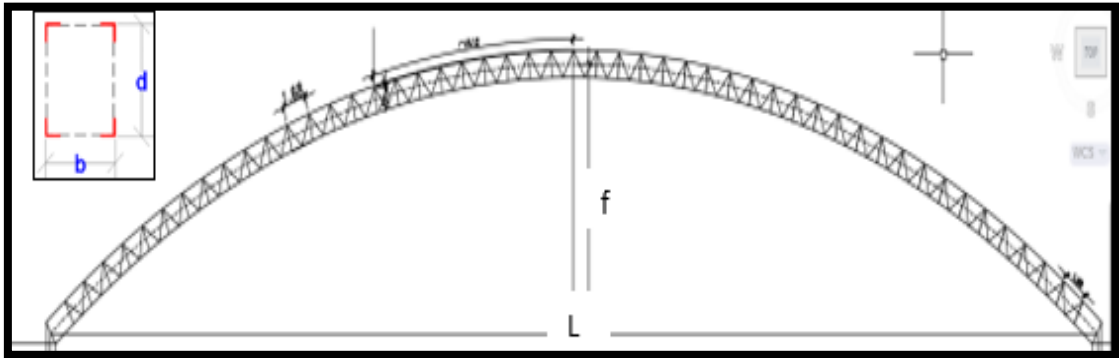


Figura 2.5. Características geométricas de una armadura espacial (Arco de viga de celosía tipo Warren con montantes intercaladas).

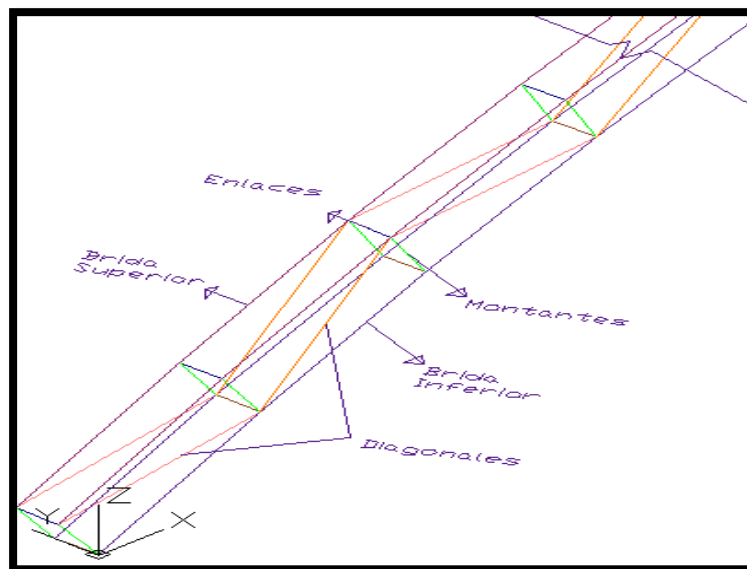


Figura 2.6. Elementos de una armadura espacial (Arco de viga de celosía Warren con montantes consecutivas).

2.2.2. Materiales para Acero Estructural

En la Norma AISC 360 (2016:69), se muestra las diferentes designaciones de los Aceros para los cuáles es necesario los informes de ensayos de materiales realizados por el fabricante o por un laboratorio de ensayos y serán considerados como evidencia suficiente mientras se realicen de acuerdo con los estándares de la norma ASTM.

- Designaciones ASTM que nos muestra la Norma:

(A) Perfiles Estructurales Laminados en Caliente

- ASTM A36/A36M ASTM A709/A709M
- ASTM A529/A529M ASTM A913/A913M
- ASTM A572/A572M ASTM A992/A992M
- ASTM A588/A588M ASTM A1043/A1043M

(B) Tubos Estructurales (HSS)

- ASTM A53/A53M, Gr. B ASTM A847/A847M
- ASTM A500/A500M ASTM A1065/A1065M
- ASTM A501/A501M ASTM A1085/A1085M
- ASTM A618/A618M

La Norma ASTM A500 es la especificación estándar para tubos estructurales de acero al carbono conformados en frío, electrosoldado y sin costura de forma redonda, cuadrada, rectangular o estructural especial formas tubulares para la construcción soldada, remachada o atornillada de puentes y edificios, y para fines estructurales generales (USI 2018).

(C) Planchas

- ASTM A36/A36M ASTM A572/A572M
- ASTM A242/A242M ASTM A588/A588M
- ASTM A283/A283M ASTM A709/A709M
- ASTM A514/A514M ASTM A1043/A1043M
- ASTM A529/A529M ASTM A1066/A1066M

(D) Barras

- ASTM A36/A36M ASTM A572/A572M
- ASTM A529/A529M ASTM A709/A709M

(E) Láminas

- ASTM A606/A606M
- ASTM A1011/A1011M SS, HSLAS, AND HSLAS-F

En esta tesis se trabajará con los tubos estructurales (HSS) de sección circular.

Los perfiles tubulares (HSS) de acero compiten, no solamente con el hormigón, sino que también pueden sustituir a otros perfiles de acero, debido a su superioridad con respecto a la resistencia y a la estabilidad. Las propiedades mecánicas y geométricas de los perfiles tubulares influyen en cómo puede conseguirse ahorro de material bajo cargas (ITEA s.f.).

2.2.3. Soldadura

La ciencia de la soldadura se ocupa de estudiar los medios prácticos, para producir uniones átomo a átomo a través de superficies metálicas preexistentes y en un número suficiente para otorgar resistencia mecánica satisfactoria (Exsa y Oerlikon s.f.: 22).

2.2.3.1. Tipos de procesos de soldadura.

En esta investigación se empleará el proceso de soldadura autógena o directa; especialmente las más comunes: la soldadura por arco sumergido (SAW) y la soldadura por fusión y presión (Resistencia eléctrica (ERW)).

2.2.3.1.1. Soldadura por resistencia eléctrica (ERW).

La coalescencia en esta gama de procesos de soldadura, es producida por la aplicación de presión y por el calor obtenido de la resistencia del material y la del espacio entre las piezas por unir, al flujo de corriente (Westarco s.f.: 13)

La temperatura de trabajo se obtiene en fracción de segundo por ende es muy rápida y económica y apropiada para la producción en masa. El calor se obtiene por el pasaje de corriente eléctrica a través de la pieza a soldar, usa corriente alterna. En este tipo de soldadura el control de la presión es de suma importancia dado que un exceso de

presión hace que el material fundido salte de las superficies de empalme, y la baja presión provoca quemadura de las superficies y picadura de los electrodos. La corriente generalmente se obtiene de un transformador reductor (Capote 2010).

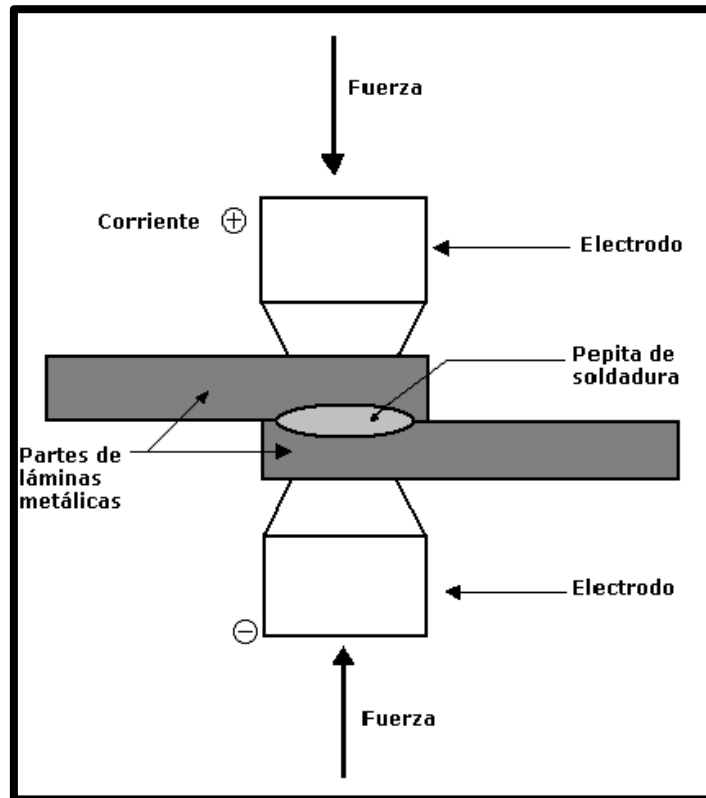


Figura 2.7: Proceso de soldadura por resistencia.

Fuente: Tomado de Capote 2010:8.

2.2.3.1.2. Soldadura por arco sumergido (SAW).

Los procesos Soldadura de arco sumergido (SAW) automáticos y semiautomáticos proporcionan consistencia, alta calidad y depósitos económicos que son particularmente apropiados para soldaduras de gran longitud. Su mayor limitación es que el trabajo debe ser en posiciones de soldaduras plana u horizontal: vigas y perfiles estructurales, estanques, cilindros de gas, bases de máquinas, fabricación de barcos, etc (Acesco s.f.).

En el sistema de soldadura de arco sumergido se utiliza un alambre desnudo que a medida que se consume, es alimentado mediante un mecanismo automático. El arco es

cubierto por un polvo granular y fusible, conocido como fundente o flujo, el mismo que es un compuesto de silicatos y minerales. El fundente cumple dos papeles, físicamente y metalúrgicamente, en lo primero hace que la escoria proteja al baño de soldadura de la acción de los gases atmosféricos, formando un cordón libre de poros e impidiendo una pérdida de calor demasiado rápida. Y en lo segundo, impide pérdida de elementos de aleación, compensando o agregándolos al metal depositado. El arco eléctrico que se forma produce el calor necesario para fundir el metal base, el alambre y el flujo que cae por gravedad cubriendo la zona de soldadura (Exsa y Oerlikon s.f.).

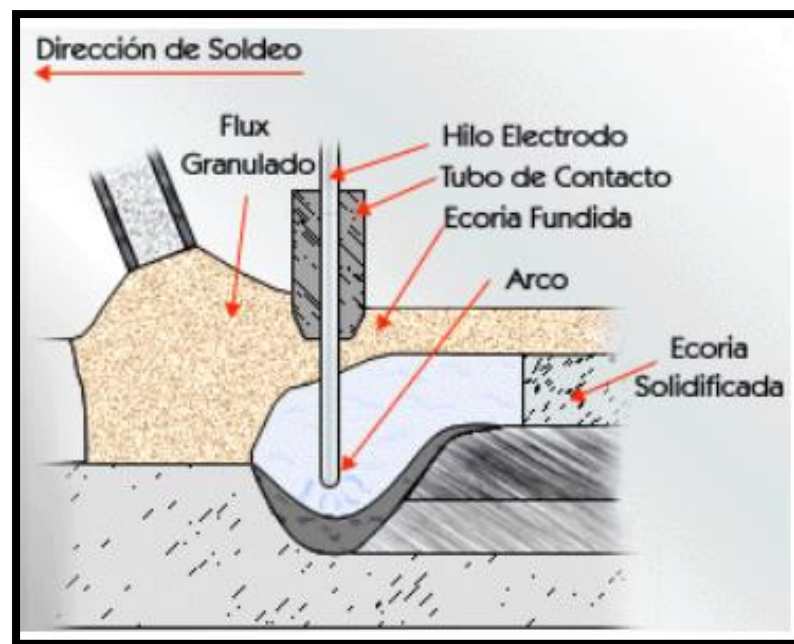


Figura 2.8: Proceso de soldadura por arco sumergido.

Fuente: Tomado de Capote 2010:6.

2.2.3.2. Soldadura en perfiles tubulares.

Los procedimientos de soldadura se pueden utilizar de la misma forma que para los perfiles abiertos de acero. Los perfiles tubulares circulares se pueden unir mediante soldaduras en ángulo, si la relación entre los diámetros de las secciones a unir no excede de 0,33, y si la separación a soldar no es mayor de 3 mm. Para relaciones mayores, la soldadura puede cambiar uniformemente, a lo largo de la curva de unión, desde soldadura en ángulo hasta soldadura a tope, o se puede emplear soldadura a tope en el perímetro completo (ITEA s.f.: 16).

Una estructura en celosía normalmente se diseña con el fin de transmitir las cargas aplicadas mediante esfuerzos axiales en las barras. No obstante, en las vigas en celosía de perfiles tubulares, los cordones son generalmente continuos, y las barras de relleno están soldadas sobre ellos generándose momentos flectores secundarios tanto en las barras como en las uniones. Sin embargo, es comúnmente aceptado que, si las barras y las uniones son capaces de redistribuir estos momentos secundarios en forma plástica, el análisis de las cargas se puede basar en la hipótesis de entramado articulado. Los momentos flectores, por el contrario, deben de tenerse en cuenta cuando los ejes de las barras no convergen en un punto de la unión, generándose una excentricidad positiva o negativa (véase figura 2.9.) (ITEA s.f.).

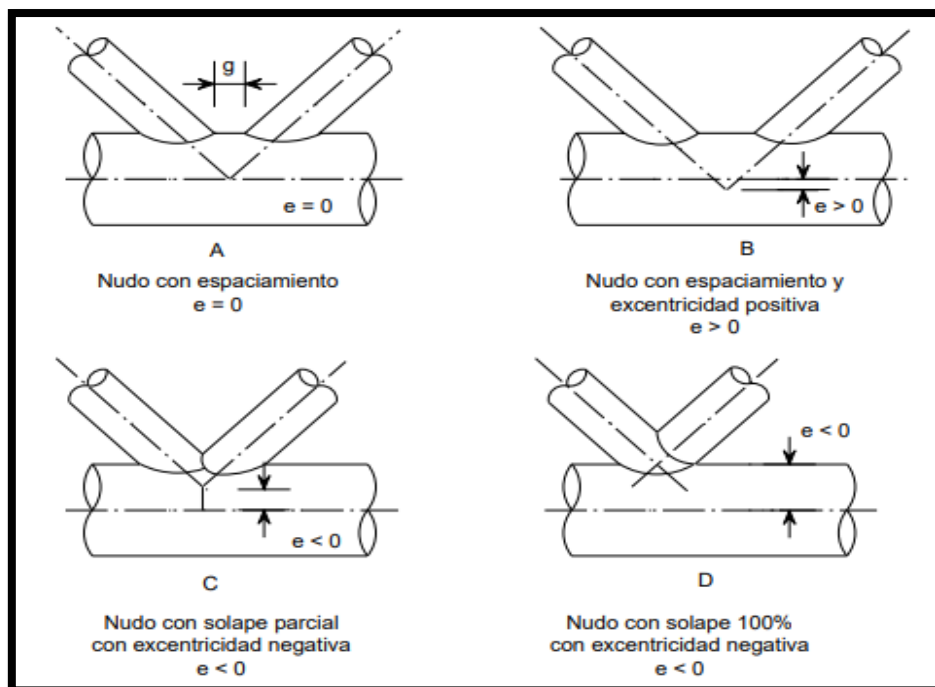


Figura 2.9. Excentricidades en las uniones de perfiles tubulares

Fuente: Tomado de ITEA s.f.: 24

Como podemos observar en la imagen A los ejes de todas las barras (líneas de centros de gravedad) que concurren en un mismo nudo deben coincidir en un mismo punto.

2.2.4. Proceso de diseño para armaduras metálicas

El proceso de diseño utilizado en esta tesis es el diseño propuesto por Gonzáles (2018:28), el cual se detalla a continuación:

1. *Planeamiento*: Etapa en la cual se crea una concepción inicial del proyecto a desarrollar, se identifican los problemas, deficiencias y fortalezas existentes.
2. *Predimensionamiento*: Esta etapa está referida a la disposición de una armadura metálica en la estructura de la cual formara parte, por ejemplo, las armaduras metálicas en su gran mayoría se usan en coberturas metálicas, entonces se define el espaciamiento o ubicación de cada armadura (teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por las diversas referencias bibliográficas afines) como parte de una cobertura metálica, determinando también así su ancho de influencia.
3. *Estimación de acciones*: Se calculan las cargas que actuarán sobre la armadura de acuerdo a la norma o código de diseño usado.
4. *Modelación paramétrica*: Se parametriza una forma o configuración estructural elegida para una armadura mediante una programación gráfica de algoritmos, es decir, en esta etapa se define una armadura en función a parámetros geométricos como luz a cubrir, peralte, número de segmentos de brida (Angulo de triangulación o Angulo entre montantes y bridas), flecha, anchos, etc. La modelación paramétrica es la base de la simulación estructural y la optimización ya que se evalúa comportamientos estructurales de una armadura cuando varían los parámetros que la definen (peralte, flecha, Angulo entre montantes y bridas, etc.) y luego se optimizan esos parámetros.
5. *Simulación estructural*: Una vez realizada la modelación paramétrica de la armadura se procede a realizar el respectivo análisis estructural para calcular las fuerzas internas, deformaciones, deflexiones, etc. Se simula los comportamientos estructurales de manera rápida y dinámica realizando el análisis estructural de las distintas armaduras generadas mediante variación de parámetros.

6. *Optimización*: Se optimiza el peso de la armadura aplicando tres tipos de optimización (optimización de tamaño, optimización geométrica y optimización topológica), mediante el complemento Karamba y herramientas fundamentadas en algoritmos genéticos (plug-in Galápagos); y en simultaneo se la diseña, ya que la optimización se realizará teniendo en cuenta las condiciones de resistencia establecidas en la norma o código de diseño usado (AISC 360-16).

Las etapas 4, 5 y 6 están sistematizadas, pero no solo en forma individual sino también en forma conjunta.

7. *Decisión*: Se evalúa si el diseño satisface con los objetivos planteados, de ser el caso se pasa a la siguiente etapa, sino se regresa a la etapa 4.

8. *Diseños finales*: Se diseña los componentes accesorios de la armadura: Placas base, pernos de anclaje, soldaduras, etc.

9. *Elaboración de planos*: Definido el diseño de la armadura, se procede a elaborar los planos con sus respectivas especificaciones técnica.

2.2.5. Modelado paramétrico.

Al igual que una función matemática, el modelado paramétrico tiene que ver con la tipología y los parámetros de entrada. La tipología de diseño corresponde a lo que el diseñador realmente modelaría geoméricamente y al construir un modelo de diseño paramétrico, el trabajo de modelado consiste en programar en lugar de ejecutar tradicionalmente comandos manuales en un imperativo software de diseño asistido por computadora (CAD). El hecho de programar nos ofrece la posibilidad de realizar cambios rápidos de diseño y se vuelve aún más interesante cuando el modelo se combina con aplicaciones de medición de rendimiento como cálculos estructurales (método de elementos finitos). Tal enlace de modelo permitirá al diseñador jugar con los parámetros y explorar los efectos de rendimiento en tiempo real (kolling 2015).

En resumen, a lo anteriormente mencionado, “El diseño paramétrico no es más que, generar y controlar todos los elementos de diseño a través de un software específico, dando paso a la construcción y optimización de geometrías sin límite de complejidad” (Valdiviezo 2014:25).

Con la evolución del diseño computacional, se ha llevado al modelado paramétrico mucho más allá, pasando de lo que inicialmente fue el dibujo asistido por computadora (AutoCAD) a los programas de hoy en día, que permiten realizar un diseño totalmente dinámico, entre ellos tenemos: los programas BIM (Modelado de la Información de Edificio) y los programas de diseño paramétrico avanzado (tienen sus propios algoritmos que influyen en los parámetros de diseño).

Dentro de los programas del primer grupo podemos mencionar a los siguientes: Revit (Autodesk), Archicad (Graphisoft), Vectorworks (Nemestchek), Edificius (ACCA software). En el segundo grupo se encuentran los siguientes programas: Rhinoceros+Grasshopper, CATIA, Generative Components, Digital Projects.

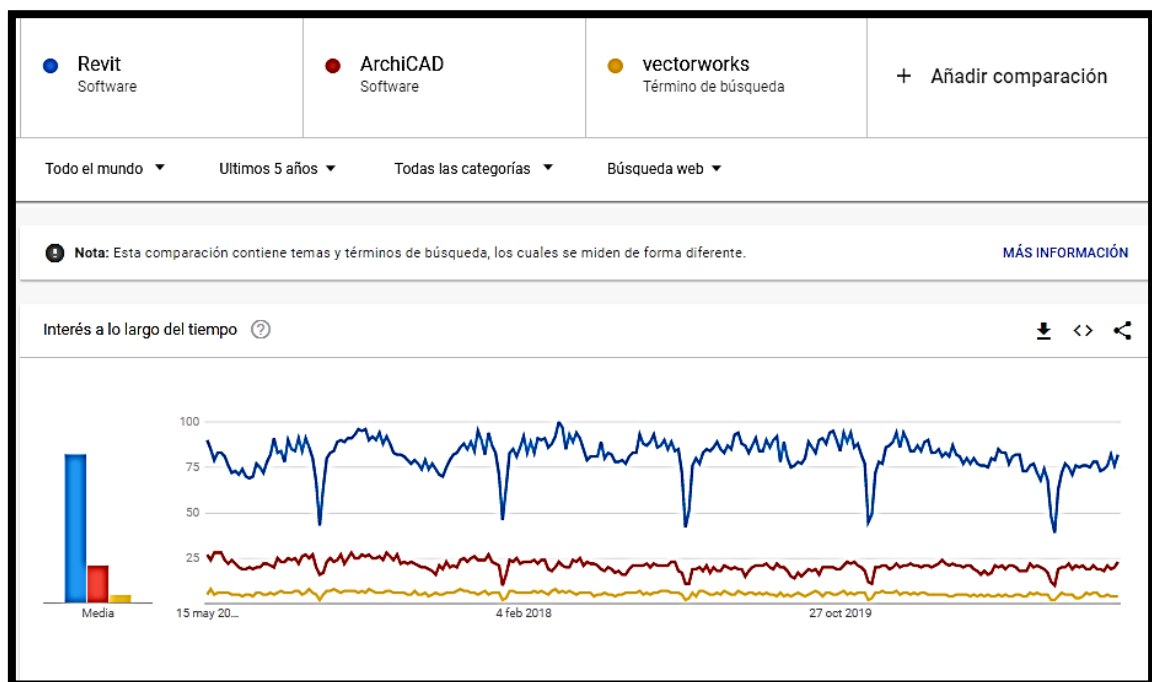


Figura 2.10. Interés de búsqueda en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas BIM: Revit, ArchiCAD, Vectorworks.

Fuente: Tomado de Google Trends 2021.



Figura 2.11. Desglose comparativo por región en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas BIM: Revit, ArchiCAD, Vectorworks.

Fuente: Tomado de Google Trends 2021.

Como podemos Observar en la *Figura 2.11*, en Perú, la herramienta paramétrica BIM más utilizada es el Software Revit.

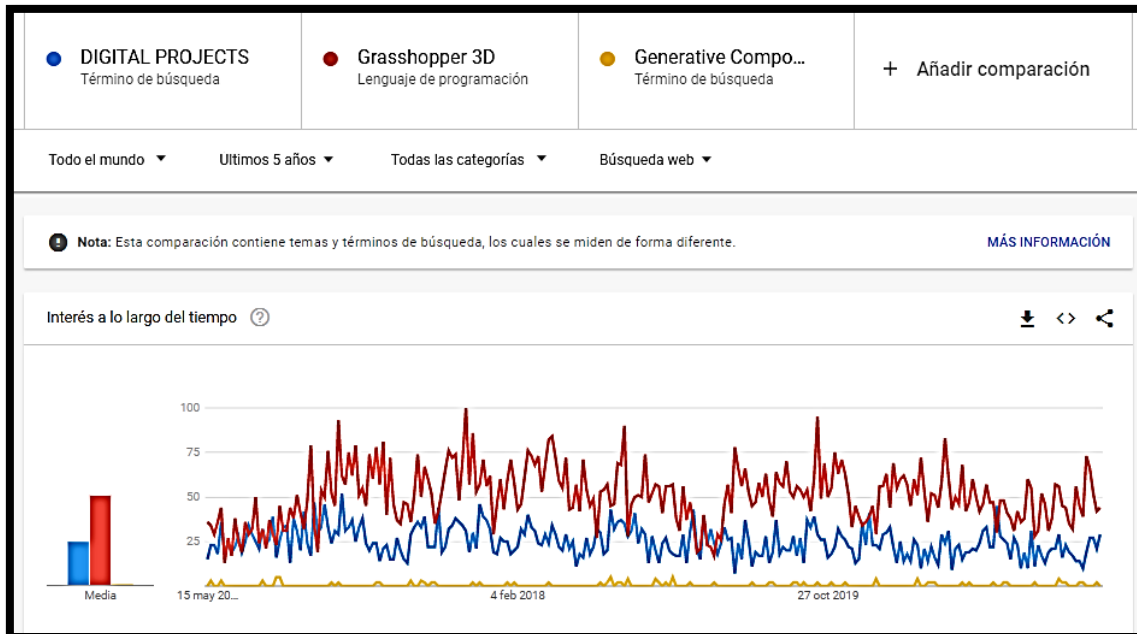


Figura 2.12. Interés de búsqueda en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas avanzadas: Digital Projects, Grasshopper 3D, Generative Components.

Fuente: Tomado de Google Trends 2021.



Figura 2.13. Desglose comparativo por región en los últimos 5 años de las herramientas paramétricas avanzadas: Digital Projects, Grasshopper 3D, Generative Components.

Fuente: Tomado de Google Trends 2021.

Como podemos Observar en la *Figura 2.13*, Perú se encuentra en el puesto 15 en interés de búsqueda por Grasshopper 3D, lo que significa que poco a poco, se va abriendo paso al diseño paramétrico o generativo.

Las herramientas paramétricas se basan en principios algorítmicos en su proceso generativo (Calheiros 2014). Este proceso, según kolarevic (2003), requiere cuatro elementos: las condiciones iniciales y los parámetros (entradas); un proceso generativo (que consta de reglas y algoritmos de modelado); el acto de generar variantes (salidas); y finalmente la selección de las mejores variantes. De esta forma, la generación de soluciones de diseño se realiza mediante la manipulación de variables (parámetros) definidas algorítmicamente.

En esta tesis se utilizará el programa Rhinoceros 3D y su complemento Grasshopper para realizar el modelado paramétrico de la cobertura metálica.

A continuación, se describen a los dos programas anteriormente mencionados:

2.2.5.1.Rhinoceros 3D

Rhinoceros es un programa de modelado NURBS en 3D para Windows. NURBS, es una representación matemática de geometría en 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas en 2D, círculos, arcos, o curvas hasta los más complejos sólidos o superficies orgánicas de formas libres en 3D (McNeel 2001:5).

En la opinión de Namoncura y Vásquez (2011) Rhinoceros es muy útil para los arquitectos y diseñadores en general pues permite modelar objetos tridimensionales de una forma libre con una multiplicidad de operaciones con precisión en base a comandos o con una interfaz gráfica sencilla. Rhinoceros posee su propio lenguaje interpretado, el Rhinoscript que tiene base el VBScript el que permite trabajar con variables, codificar algoritmos genéticos, usar las distintas funciones dentro del programa incluso permite a el programador intervenir la interfaz, ésta sería su ventaja más notable.



Figura 2.14. Logo Tipo del software Rhinoceros 3D

Fuente: Tomado de CIMCO 2019

Es compatible con los softwares comerciales y su interface permite integrar herramientas CAM (Computing Aided Manufacturing) Y CAE (Computing Aided Engineering). Rhinoceros es un programa revolucionario que se ha hecho un hueco frente a los Softwares más potentes (Valdiviezo 2014). Recalcando que por sí solo no es considerado un software paramétrico, pero tiene la ventaja de tener código abierto para insertar plug-in.

2.2.5.2.Grasshopper

El complemento Grasshopper fue creado en el año 2008 y funciona asociando ciertas partes de geometría creadas dentro de Rhinoceros con un algoritmo gráfico editor que permite a los diseñadores generar formas paramétricas. Dicha geometría se previsualiza dentro de la interfaz de Rhinoceros y cualquier cambio en las cadenas del resultado de la transformación gráfica tiene una actualización visual inmediata. Uno de los componentes más novedosos dentro de Grasshopper es " slider". El usuario puede usar un mouse para "deslizar" a lo largo de un rango de valores numéricos y obtener retroalimentación visual instantánea del efecto geométrico de un parámetro cambiante. La función de animación está integrada en el control deslizante que permite al usuario preestablecer una serie de iteraciones entre extremos personalizados. Las iteraciones se almacenan como imágenes de viewport y pueden ser compilado en una animación (Lagios et al. 2010).



Figura 2.15. Logo tipo de Grasshopper

Fuente: Tomado de Master 3Digital 2015.

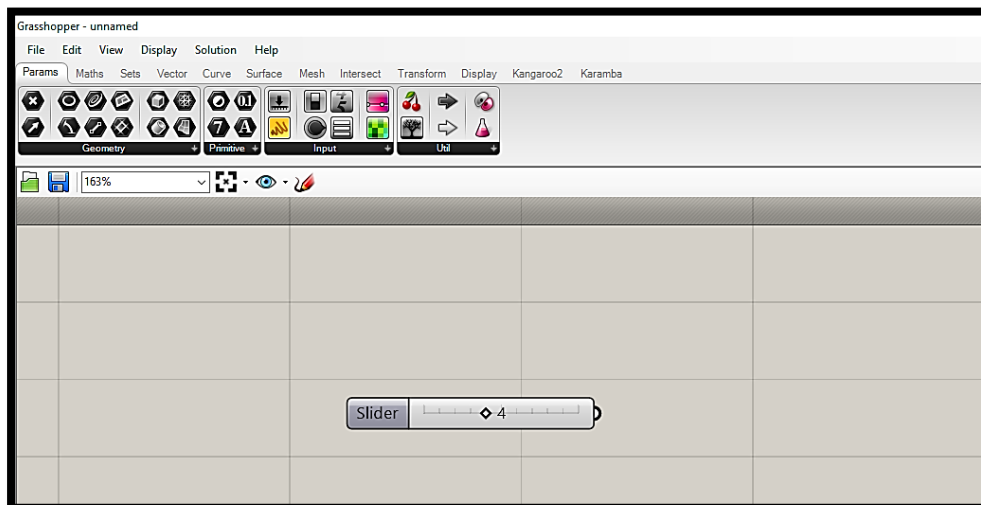


Figura 2.16. Componente "slider" en Grasshopper.

En Grasshopper, los parámetros contienen los datos variables del algoritmo, los componentes contienen los diferentes pasos a seguir con las acciones que cumplen una función, la principal característica de Grasshopper, es que posee un componente llamado Galápagos que posibilita trabajar con algoritmos genéticos sobre una interfaz gráfica (Loja 2014:86).

Más adelante hablaremos del componente Galápagos con mayor detalle.

Como ya notamos, a Grasshopper se describe como una herramienta para explorar nuevas formas, sin embargo, hay una variedad de herramientas adicionales que mejoran la funcionalidad del programa. Dichas herramientas adicionales incluyen modelado de interacciones físicas, lectura de datos de sensores en tiempo real, importación de clima datos, computación evolutiva, así como autómatas celulares y simulaciones basadas en agentes (Mackenzie, 2008).

Gracias a Grasshopper, complemento de Rhino, pasamos del diseño tradicional al diseño paramétrico y como menciona Gonzáles (2018) la modelación paramétrica es la base de la simulación estructural y la optimización ya que se evalúa comportamientos estructurales de una armadura cuando varían los parámetros que la definen y se optimizan dichos parámetros. He allí, su gran importancia.

2.2.6. Simulación estructural: Karamba

Karamba 3D ha sido y sigue siendo desarrollado por Clemens Preisinger en cooperación con Bollinger und Grohmann ZTGmbH en Viena (Rhinceros Forums 2018).



Figura 2.17. Logo tipo de Karamba 3D.

Fuente: Tomado de karamba3d c2021.

Karamba es una herramienta de ingeniería estructural paramétrica que proporciona un análisis preciso de armazones espaciales, marcos y conchas. Está completamente integrado en el entorno de diseño paramétrico de Grasshopper, complemento para la herramienta de modelado 3D Rhinoceros. Esto facilita la combinación de modelos geométricos parametrizados, cálculos de elementos finitos y algoritmos de optimización como Galápagos (Preisinger 2013).

Alegría (2014), comenta que Karamba, a pesar de no ser un software tan completo como otros paquetes de software de elementos finitos (FE) para análisis de ingeniería sofisticados, se desarrolla con el propósito de proporcionar una rápida retroalimentación estructural para el diseño y análisis conceptual (modelización paramétrica). En estas primeras fases del proyecto, la flexibilidad del diseño es más importante que el análisis detallado.

Veamos las distintas aplicaciones de Karamba que va desde el nivel de dificultad simple, moderada y difícil.

- **Dificultad: simple**

La imagen representa a una armadura configurada paraméricamente donde la altura y el número de divisiones pueden ser alterados.

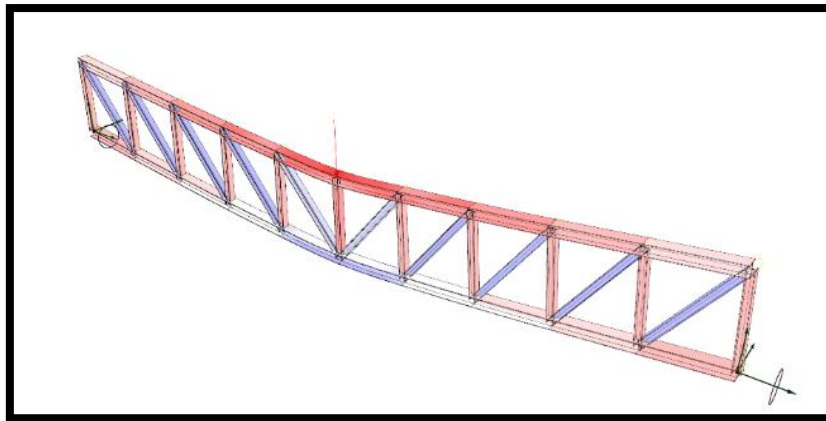


Figura 2.18. Armadura paramétrica.

Fuente: Tomado de karamba3d c2021.

- **Dificultad: Moderada**

La imagen muestra el efecto de diferentes tipos de sistemas de arriostramiento horizontal.

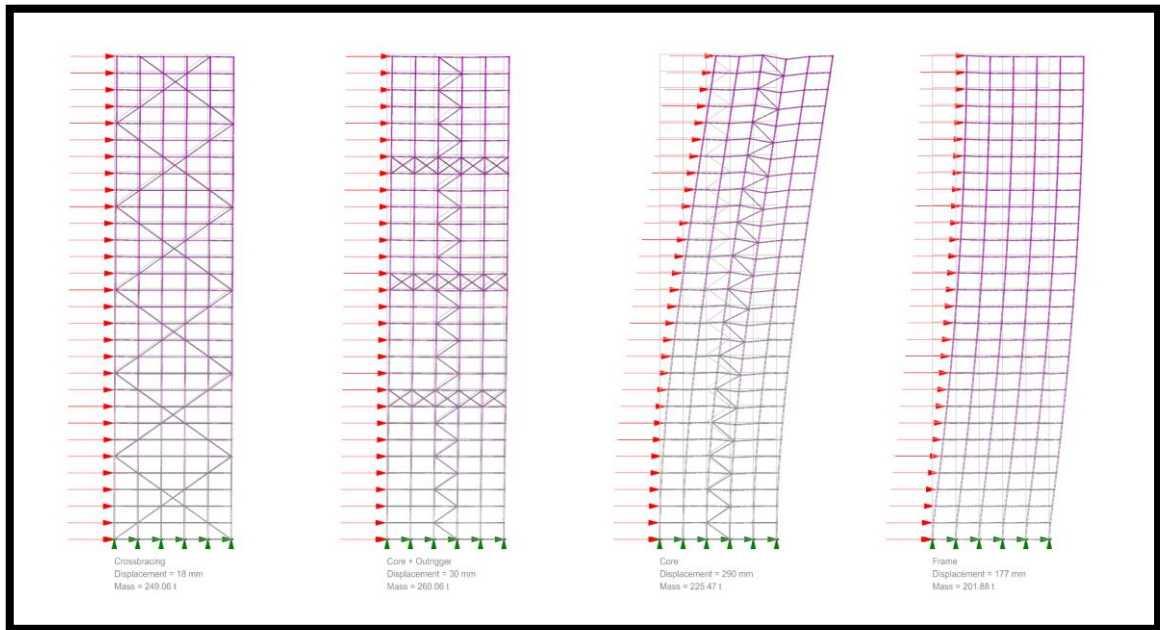


Figura 2.19. Sistemas de gran altura.

Fuente: Tomado de karamba3d c2021.

- **Dificultad: Difícil**

Las propiedades de los módulos dependen de las fuerzas internas de la estructura, que es una cuadrícula de espacio tetraédrico.

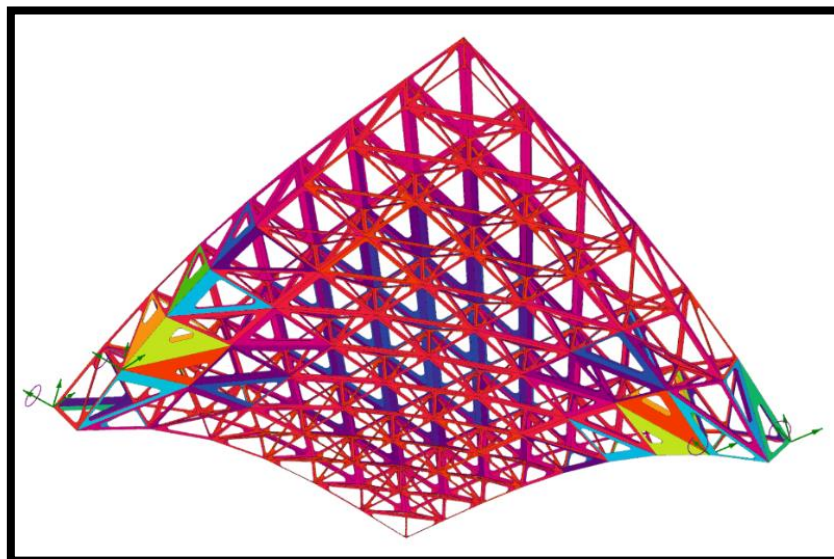


Figura 2.20. Geometría informada bordes del módulo de escalas por fuerzas internas.

Fuente: Tomado de karamba3d c2021.

2.2.7. Optimización estructural:

El término estructura óptima es muy vago. Esto se debe a que una estructura puede ser óptima en diferentes aspectos, los cuales se denominan objetivos y pueden, por ejemplo, ser el peso o rigidez de la estructura. Una evaluación numérica de un determinado objetivo es posible a través de una función objetivo, f , que determina la bondad de la estructura. Por supuesto, la optimización debe realizarse dentro de restricciones; de lo contrario, es un problema sin una solución bien definida. En primer lugar, hay restricciones de diseño, como una extensión geométrica limitada o disponibilidad limitada de diferentes partes estructurales (Christensen y Klarbring 2008).

Victoria (2006:2) menciona que el problema de diseño óptimo se entiende actualmente como aquél que se plantea determinar el valor de una serie de variables de manera que se minimice (ó maximice) el valor de una función objetivo. En términos matemáticos, el problema se puede formular como: encontrar el vector de variables de diseño x que:

$$\begin{aligned} &\text{Minimice } f(x) \\ &\text{sueto a } h_j(x) = 0 && j = 1, \dots, m_i \\ &g_k(x) \geq 0 && k = 1, \dots, m_d \\ &x_i^l \leq x_i \leq x_i^s && i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (1.1)$$

Donde:

X	vector n-dimensional de variable de diseño
$f(x)$	función objetivo, representa el criterio óptimo
$h_j(x)$	Restricción de diseño de igualdad j
$g_k(x)$	Restricción de diseño de desigualdad k
m_i	Numero de restricciones de igualdad
m_d	Numero de restricciones de desigualdad
x_i^l	Límite inferior de las variables de diseño i
x_i^s	Límite superior de las variables de diseño i
x_i	Variable de diseño i
n	Numero de variables

2.2.7.1. Restricciones

En la mayor parte de los problemas complejos, como es el diseño de una estructura, no pueden tratarse libremente teniendo en cuenta todas las elecciones posibles, sino que debe descomponerse en subproblemas separados. En donde, cada uno de estos subproblemas tienen restricciones que han sido impuestas para acortar el campo de exploración. Por lo tanto, las restricciones son condiciones que debe de cumplir el diseño para que pueda ser considerado como válido, planteándose en función de las variables, a las que se les exige tener un valor o mantenerse dentro de unos límites (Victoria 2006), para este caso específico de investigación las restricciones vienen dadas por una norma que rige el diseño de estructuras de acero: la AISC 360-2016.

2.2.7.2. Tipos de optimización estructural:

Victoria (2006), refiere que existen tres tipos de optimización estructural, las cuales se pasan a describir:

- 1) **Optimización del tamaño:** se refiere a las propiedades geométricas de la sección transversal de los elementos que componen la estructura. Este es el tipo más sencillo de optimización estructural.

Para esta investigación se optimizará las secciones de cada uno de los elementos del arco de celosía y vigueta tridimensional haciendo uso del complemento Galápagos, de tal forma que soporten las fuerzas internas según diseño de la AISC 360-2016. Con la restricción de que los ratios de diseño sean valores próximos a uno, pero siempre menor que uno. El ratio viene a ser la relación entre la fuerza actuante y la fuerza resistente de cada elemento.

- 2) **Optimización de la geometría:** utiliza variables asociadas a la forma de la estructura. Estas variables controlan la geometría del diseño y requieren a menudo de un modelo de análisis que se readapte durante el proceso de optimización.

Para esta investigación se optimizará el peralte y ancho para el caso del arco de celosía y para el caso de la vigueta tridimensional, el peralte y el número de diagonales, haciendo uso del complemento Galápagos.

- 3) **Optimización topológica:** Determina el diseño de elementos, esto significa la existencia o ausencia de material en lugares específicos en el dominio estructural.

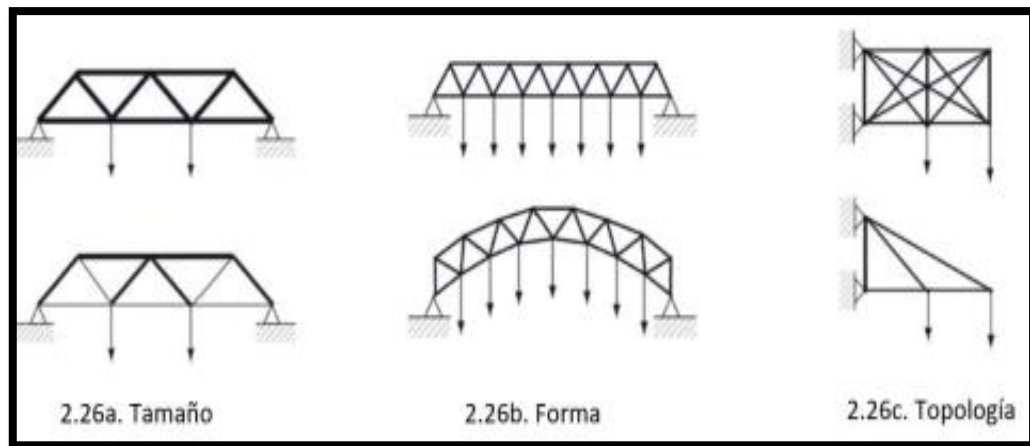


Figura 2.21. Tres tipos de optimización estructural.

Fuente: Tomado de Richardson 2010.

La optimización de estructuras ha sido objeto de un intenso estudio durante los últimos cincuenta años. Aunque la Programación Matemática fue inicialmente la técnica más empleada, ha sido reemplazada por un conjunto de técnicas meta heurísticas. Entre ellas los Algoritmos Genéticos (AG) es la técnica más importante (Sánchez et al. 2012:2).

2.2.8. Algoritmos genéticos:

Un algoritmo es una serie de pasos que describen el proceso de búsqueda de una solución a un problema concreto. Y un algoritmo genético es cuando se usan mecanismos que simulan los de la evolución de las especies de la biología para formular esos pasos. Es una técnica metaheurística de optimización inspirada en la idea de que el que sobrevive es el que está mejor adaptado al medio, es decir la misma que subyace a la teoría de la evolución que formuló Charles Darwin y que combina esa idea de la evolución con la genética (Núñez 2019).

Para aplicar el AG se requieren de cinco componentes, Sivanandam y Deepa (2008) los describe de la siguiente manera:

En primer lugar, se parte de una población inicial de tamaño N formada por individuos que representan las posibles soluciones factibles del problema a resolver. Dentro del proceso evolutivo computacional, cada individuo se codifica en un

cromosoma, una secuencia de genes que almacenan características, es aquí donde entra **fitness** (responsable de evaluar los individuos y asignarle valores de adaptación) la cual es una función del valor correspondiente a la **función objetivo** (FO) y proporciona una medida de desempeño del sistema asociado a ciertos individuos de la población. Cada cromosoma pasa por un proceso de **selección**, este operador busca escoger a ciertos individuos de la población de acuerdo a su “aptitud” para que sean quienes den origen a la futura población. Seleccionados los padres, y previamente establecidos, se ejecutan los procesos de reproducción, es decir el **cruce**, con este operador se obtendrá como resultado una solución hijo que posee información genética de ambos padres y hace parte de una nueva generación dentro de la población de posibles soluciones. De acuerdo a un valor de probabilidad, se puede dar una **mutación**, este operador consiste en alterar las características genéticas de la solución hijo, con el fin de evitar una convergencia de toda la población hacia un punto del espacio de búsqueda no deseado (óptimo local). Dependiendo de la estrategia a utilizar, esta nueva población se conforma únicamente de las soluciones hijo o de una combinación de las mejores soluciones padre e hijo. Este proceso se repite hasta alcanzar un número máximo de generaciones, hasta que el proceso converja hacia una solución cercana al óptimo o hasta que se cumpla cualquier otro criterio de parada definido por el evaluador (Ver *Figura 2.22*).

El éxito de esta técnica de optimización en todos los ámbitos del saber ha sido incuestionable, superando en muchos casos al resto de técnicas de optimización. A diferencia de otras técnicas como la Programación Matemática, el planteamiento de los problemas de optimización de estructuras realiza la optimización simultánea del tamaño y topología de las mismas ya que esto no supone un problema añadido para este tipo de algoritmos (Sánchez 2012).

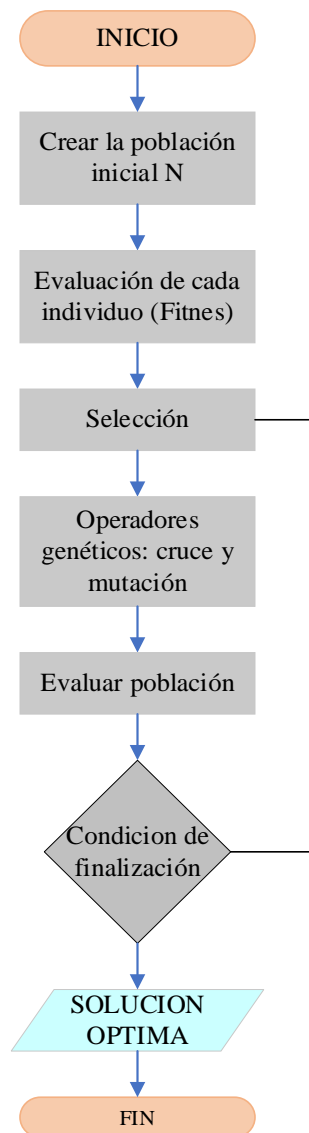


Figura 2.22. Diagrama de un algoritmo genético usado en la optimización.

Fuente: Adaptado de García y Martín, citado por Orozco 2007.

2.2.9. Computación evolutiva:

Si algo funciona bien, ¿Por qué no imitarlo? Gestal (s.f.) nos comenta que la respuesta a dicha pregunta nos lleva directamente a los orígenes de la computación evolutiva, ya que durante millones de años diferentes especies se han adaptado para poder sobrevivir en un medio cambiante. De la misma manera, en el caso de un problema a resolver, se podría tener una población de potenciales soluciones de las que se irían

seleccionando las mejores hasta que se adapten perfectamente al medio, es decir encontrar la solución más óptima posible.

Formalmente la computación evolutiva se refiere al “estudio de los fundamentos y aplicaciones de ciertas técnicas heurísticas basadas en los principios de la evolución natural” (Tomassini 1995: 87). Existen 03 paradigmas que conforman la siguiente ecuación evolutiva (Gestal s.f.).

$$\text{Computación evolutiva} = \text{Algoritmos genéticos} + \text{Estrategias de evolución} + \text{Programación evolutiva}$$

Los algoritmos son capaces de generar y manipular computacionalmente entidades de diseño como formas geométricas, estructuras de datos, expresiones matemáticas u operaciones lógicas. Este nivel de control del proyecto permite al diseñador aumentar la productividad, evaluar las limitaciones del diseño, abordar adecuadamente las complejidades y responder de manera eficaz (Gürsel 2012).

En este trabajo de investigación se pretende explorar el campo de la optimización haciendo uso de la computación evolutiva y para ello utilizamos el plug-in Galápagos en conjunto con los softwares que se ha mencionado líneas arriba, Rhinoceros y el complemento Grasshopper, veamos cómo se relacionan en el gráfico adjunto.

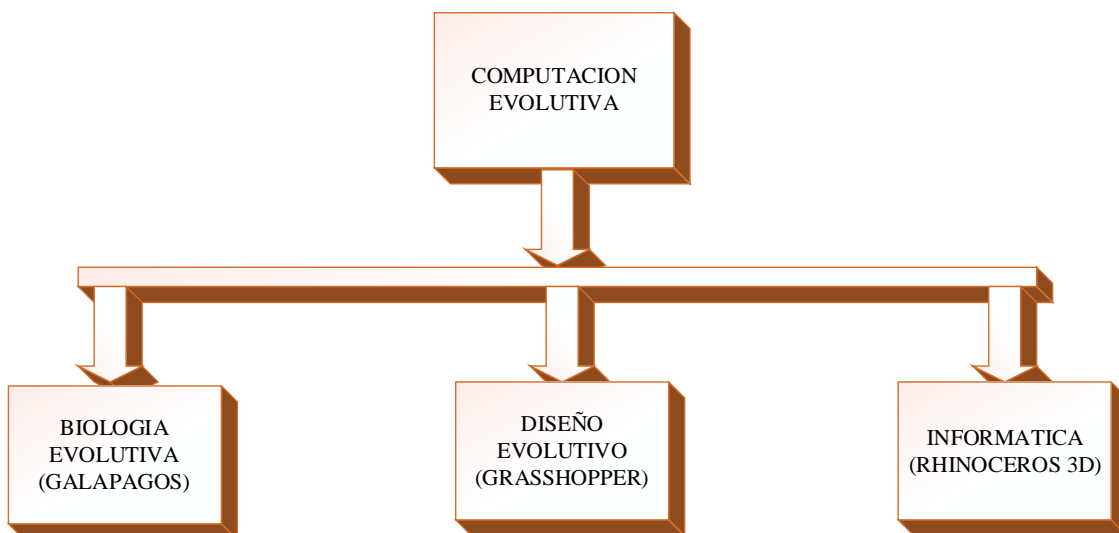


Figura 2.23. Componentes que forman parte de la computación evolutiva.

Fuente: Adaptado de Loja 2014.

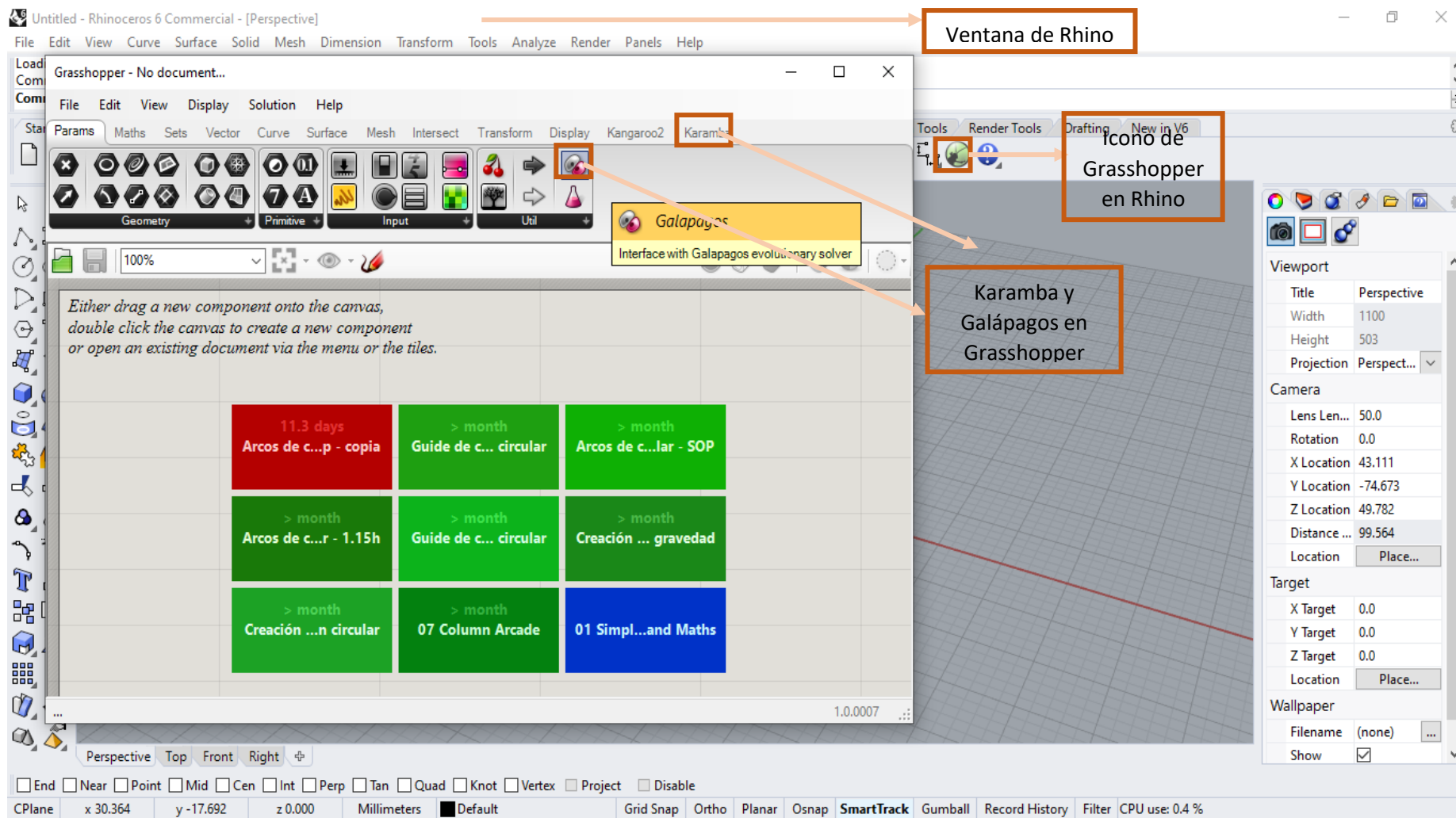


Figura 2.24. Interrelación entre Rhinoceros 3D-Grasshopper-Karamba-Galápagos.

2.2.9.1. Galápagos, plug-in de Grasshopper

Galápagos es el optimizador estándar de algoritmos genéticos de Grasshopper (GH) y, al igual que GH, Galápagos también es desarrollado por David Rutten (Kolling 2015).

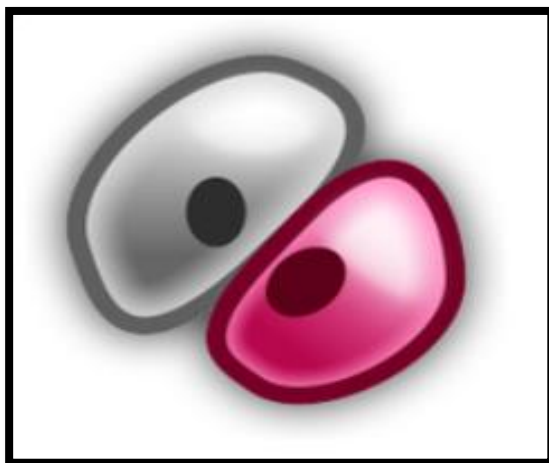


Figura 2.25. Logotipo de Galápagos

Fuente: Tomado de Grasshopper c2021.

Veamos como Calheiros (2014) describe el proceso de Optimización, Galápagos creará individuos al azar que darán lugar a la población inicial. El número de individuos suele estar entre 50 y 200 individuos, cuyo valor puede definirse a priori. Para cada individuo creado, el algoritmo elegirá aleatoriamente un valor para cada gen, definiendo un genoma. Después de poblar al azar, se elegirán individuos que tengan mayor aptitud para generar descendencia.

Luego de ejecutar Galápagos, es posible obtener soluciones que optimizan el problema.

Galápagos funciona con una sola función de fitness, mientras que Octopus maneja hasta cinco a la vez. Octopus es el otro plug-in gratuito para Grasshopper, desarrollado por Robert Vierlinger, quien también trabaja para Bollinger + Grohmann y también está a bordo del equipo de desarrollo de Karamba. En principio Galápagos puede manejar la optimización multiobjetivo, pero esto requiere la normalización de los valores de los elementos combinados, lo que requiere además un conocimiento preexistente del rango de valores para los elementos individuales calculados (Kolling 2015).

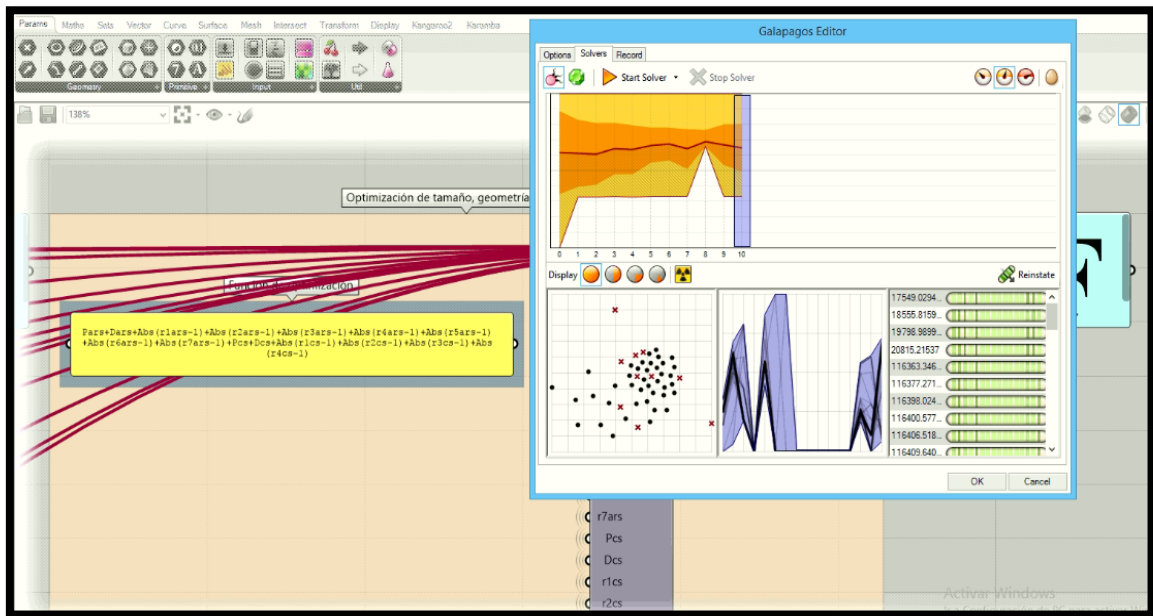


Figura 2.26. Proceso de optimización con la ejecución del algoritmo genético en el plug-in Galápagos.

En la interfaz que se muestra en la Figura 2.26, contiene un gráfico de puntos que muestra el comportamiento de cada individuo y cuáles van adquiriendo mayor importancia dentro de la población. Luego un gráfico de líneas que muestra la mutación que existe. Además de gráficos de barras que muestra el cruce que existe entre los individuos mejor evaluados. También genera un informe de los comportamientos de generación en generación durante la búsqueda del más óptimo entre el conjunto de posibles soluciones, en cada generación se evalúan los individuos y su porcentaje de adaptación a la función fitness. Punto de mutación dentro de la generación y porcentaje de genes que se adaptan a la solución.

2.2.10. Consideraciones de diseño

Las consideraciones de diseño involucran recomendaciones de cumplimiento obligatorio. Existen normas que especifican ciertas relaciones y valores límite. Dentro de los Institutos Normativos está el American Institute of Steel Construction (AISC 360) y usaremos las “Especificaciones para Construcciones de Acero Estructural”, las cuáles detallaremos a continuación:

2.2.10.1. Diseño por Resistencia Usando Diseño en Base a Factores de Carga y Resistencia (LRFD)

El diseño de acuerdo con las disposiciones de diseño en Base a Factores de Carga y Resistencia (LRFD) satisface los requisitos de esta Especificación cuando la resistencia de diseño de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga LRFD. Véase la ecuación (2.2):

$$R_u \leq \phi R_n \quad \dots (2.2)$$

Donde:

R_u = resistencia requerida (usando combinaciones de carga LRFD).

R_n = resistencia nominal.

ϕ = factor de resistencia.

ϕR_n = resistencia de diseño.

Según Norma Técnica de Edificaciones E0.90 “ESTRUCTURAS METÁLICAS” (2006) cargas nominales deben ser consideradas son las siguientes:

- D : Carga muerta debida al peso propio de los elementos y los efectos permanentes sobre la estructura.
- L : Carga viva debida al mobiliario y ocupantes.
- Lr : Carga viva en las azoteas.
- W : Carga de viento.
- S : Carga de nieve.
- E : Carga de sismo de acuerdo a la Norma E.030 Diseño Sismorresistente.
- R : Carga por lluvia o granizo.

La resistencia requerida de la estructura y sus elementos debe ser determinada para la adecuada combinación crítica de cargas factorizadas. El efecto crítico puede ocurrir cuando una o más cargas no estén actuando. Para la aplicación del método LRFD, las siguientes combinaciones deben ser investigadas:

$$1,4 D \quad \dots (2.3)$$

$$1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) \quad \dots (2.4)$$

$$1,2D + 1,6(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) + (0,5L \text{ ó } 0,8 W) \quad \dots (2.5)$$

$$1,2D + 1,3W + 0,5L + 0,5(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) \quad \dots (2.6)$$

$$1,2D \pm 1,0E + 0,5 L + 0,2S \quad \dots (2.7)$$

$$0,9D \pm (1,3W \text{ ó } 1,0E) \quad \dots (2.8)$$

En las combinaciones (2.5), (2.6) y (2.7) el factor de cargas para L debe ser considerado como 1,0 en el caso de estacionamientos, auditorios y todo lugar donde la carga viva sea mayor a 4800Pa.

2.2.10.2. Clasificación de las secciones según pandeo local:

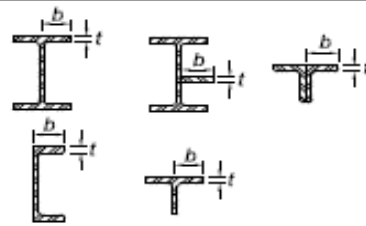
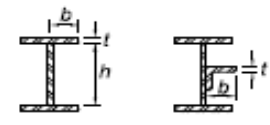
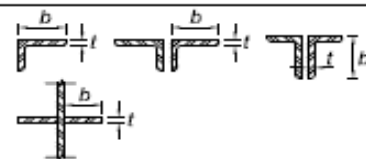
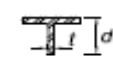
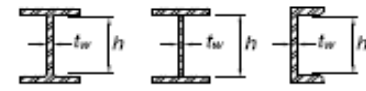
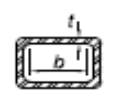
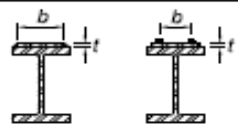


Para compresión, las secciones se clasifican como secciones de elementos no esbeltos o secciones de elementos esbeltos. Para una sección de elementos no esbeltos, la relación ancho/espesor de sus elementos a compresión no debe exceder los valores λ_r de la tabla 2.1. Si la relación ancho/espesor de cualquier elemento a compresión excede el valor λ_r , la sección se considera como sección de elementos esbeltos.

2.2.10.3. Elementos rígidos:

Para elementos rígidos soportados a lo largo de dos bordes paralelos a la dirección de la fuerza de compresión, el ancho se tomará de la siguiente manera:

Para bridas de secciones estructurales huecas rectangulares (HSS), el ancho b es la distancia libre entre almas menos el radio de la esquina interior de cada lado. Para almas de secciones HSS rectangular, h es la distancia libre entre las bridas, menos el radio de la esquina interior de cada lado.

Tabla 2.1: Relaciones ancho/espesor: Elementos a compresión – Miembros sujetos a compresión axial.

TABLE B4.1a Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements Members Subject to Axial Compression				
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio λ_c (nonslender/slender)	Examples
Unstiffened Elements	1 Flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections, outstanding legs of pairs of angles connected with continuous contact, flanges of channels, and flanges of tees	b/t	$0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2 Flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	b/t	$0.64\sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a]	
	3 Legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	b/t	$0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4 Stems of tees	d/t	$0.75\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	5 Webs of doubly symmetric rolled and built-up I-shaped sections and channels	h/t_w	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6 Walls of rectangular HSS	b/t	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7 Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8 All other stiffened elements	b/t	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9 Round HSS	D/t	$0.11\frac{E}{F_y}$	

Fuente: Tomado del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC 360, 2016).

En esta investigación se trabajó con secciones tubulares (Hss) circulares, por lo tanto, para verificar la relación ancho/espesor, se considerará el caso 9 de la tabla anterior.

2.2.10.4. Diseño de espesor de pared para HSS:

El espesor de la pared de diseño t , se utilizará en cálculos que involucran el espesor de pared de secciones estructurales huecas (HSS). El espesor de la pared de diseño t , se tomará igual a 0,93 veces el espesor de pared nominal para HSS de soldadura con resistencia eléctrica (ERW) e igual al espesor nominal para HSS de soldadura por arco sumergido (SAW).

Las tuberías ASTM A500 HSS y ASTM A53 de grado B son producidos por un proceso ERW. El proceso SAW se utiliza en secciones transversales que son más grandes que las permitidas por ASTM A500.

2.2.10.5. Determinación del área bruta y área neta:

- Área Bruta: El área bruta de un miembro A_g , es el área total de la sección transversal.
- Área Neta: El área neta A_n de un miembro es la suma de los productos de los espesores por sus respectivos anchos netos, calculados como se indica a continuación:

Para calcular el área neta para tensión y corte, la perforación para alojar un conector deberá aumentarse 0,2 cm (2mm) respecto de la dimensión nominal de la perforación.

Para una cadena de perforaciones en cualquier línea diagonal o zigzag, el ancho neto se obtendrá deduciendo del ancho bruto la suma de las dimensiones de los diámetros de las perforaciones o ranuras según se indica en esta sección, de todas las perforaciones en una cadena, y agregando para cada cambio en zigzag en la cadena la cantidad:

$$S^2/4g$$

Dónde:

s : distancia longitudinal centro a centro de dos perforaciones consecutivas (paso), in. (mm)

g : distancia transversal centro a centro (gramil) entre líneas de conectores, in. (mm)

Para ángulos, la separación de las perforaciones en alas opuestas adyacentes, será las sumas de las distancias medidas desde el respaldo del ángulo menos el espesor.

Para secciones tubulares ranuradas soldadas a una plancha gusset, el área neta A_n , es el área de la sección transversal menos el producto del espesor y el ancho total del material que es removido para hacer la ranura.

No se considerará el metal de la soldadura en la determinación del área neta a través de soldaduras de tapón o ranura.

Para secciones sin perforaciones el área neta A_n , es igual al área bruta A_g .

En esta tesis se trabajó con secciones conectadas por soldadura y sin perforaciones, por lo tanto, el área neta será igual al área bruta.

2.2.10.6. Diseño de miembros a tensión:

El diseño está aplicado a miembros sujetos a tensión axial causada por fuerzas estáticas que actúan a lo largo de sus ejes centroidales.

2.2.10.6.1. Límites de esbeltez:

No existe límite de esbeltez máxima para miembros en tensión. Para miembros diseñados básicamente en tensión, se prefiere que la razón de esbeltez L/r no exceda de 300. Esta sugerencia no se aplica a barras o colgadores en tensión.

2.2.10.6.2. Resistencia a la tensión:

La resistencia de diseño en tensión, $\Phi_1 P_n$, o la resistencia admisible en tensión, P_n/Ω , de miembros tensionados debe ser el menor valor obtenido de acuerdo con los estados límites de fluencia en tensión calculado en la sección bruta y ruptura en tensión calculado en la sección neta.

- a) La fluencia en tensión en la sección bruta se calcula con la ecuación (2.9):

$$\begin{aligned} P_n &= F_y A_g \\ \Phi_1 &= 0,90(LRFD) \quad \dots \quad (2.9) \\ \Omega_t &= 1,67(ASD) \end{aligned}$$

- b) La ruptura en tensión en la sección neta se obtiene empleando la ecuación (2.10):

$$\begin{aligned} P_n &= F_u A_e \\ \Phi_1 &= 0,75(LRFD) \quad \dots \quad (2.10) \\ \Omega_t &= 2,00(ASD) \end{aligned}$$

Dónde:

A_e = Área neta efectiva (en in^2 o mm^2).

A_g = Área bruta del miembro (en in^2 o mm^2).

F_y = Tensión de fluencia mínima especificada (en ksi o MPa).

F_u = Tensión última mínima especificada (en ksi o MPa).

Cuando miembros sin perforaciones están completamente conectados por soldadura, el área neta efectiva usada en la Ecuación (2.10) debe ser la definida en Sección 2.2.10.7. Cuando se presentan perforaciones en el miembro con conexiones soldadas en sus extremos, o en conexiones soldadas mediante soldadura de ranura o tapón, debe usarse el área neta efectiva a través de las perforaciones en la Ecuación (2.10).

2.2.10.7. Área neta efectiva (A_e):

El área bruta A_g , y el área neta A_n , de elementos tensionados deben ser determinadas de acuerdo con las disposiciones de la sección 2.2.10.5. El área neta efectiva de los miembros tensionados debe ser determinada con la ecuación (2.11)

$$A_e = A_n U \quad \dots (2.11)$$

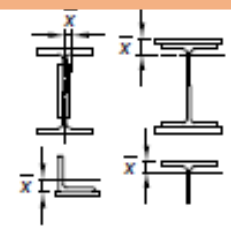
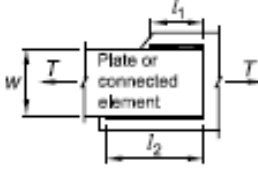

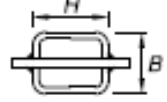
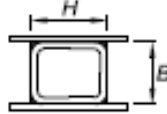
Dónde:

U: Factor de corte diferido (shear lag), es determinado como se muestra en la

Tabla 2.2.

En esta investigación para encontrar el factor de corte diferido (U), utilizaremos el caso 1 de la tabla siguiente, donde nos menciona: Cuando se aplica a todos los miembros de tensión donde la carga de tensión se transmite directamente a cada uno de los elementos transversales mediante sujetadores o soldaduras (excepto en los casos 4, 5 y 6) el valor de U es 1.

Tabla 2.2: Factores de corte diferido para conexiones de miembros a tensión.

TABLE D3.1			
Shear Lag Factors for Connections to Tension Members			
Case	Description of Element	Shear Lag Factor, U	Example
1	All tension members where the tension load is transmitted directly to each of the cross-sectional elements by fasteners or welds (except as in Cases 4, 5 and 6).	$U = 1.0$	-
2	All tension members, except HSS, where the tension load is transmitted to some but not all of the cross-sectional elements by fasteners or by longitudinal welds in combination with transverse welds. Alternatively, Case 7 is permitted for W, M, S and HP shapes. (For angles, Case 8 is permitted to be used.)	$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$	
3	All tension members where the tension load is transmitted only by transverse welds to some but not all of the cross-sectional elements.	$U = 1.0$ and $A_n =$ area of the directly connected elements	-
4 ^[a]	Plates, angles, channels with welds at heels, tees, and W-shapes with connected elements, where the tension load is transmitted by longitudinal welds only. See Case 2 for definition of \bar{x} .	$U = \frac{3l^2}{3l^2 + w^2} \left(1 - \frac{\bar{x}}{l}\right)$	
5	Round HSS with a single concentric gusset plate through slots in the HSS.	$l \geq 1.3D, U = 1.0$ $D \leq l < 1.3D, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	
6	Rectangular HSS.		
	with a single concentric gusset plate	$l \geq H, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B+H)}$	
	with two side gusset plates	$l \geq H, U = 1 - \frac{\bar{x}}{l}$ $\bar{x} = \frac{B^2}{4(B+H)}$	
7	W-, M-, S- or HP-shapes, or tees cut from these shapes. (If U is calculated per Case 2, the larger value is permitted to be used.)	$b_f \geq \frac{2}{3}d, U = 0.90$ $b_f < \frac{2}{3}d, U = 0.85$	-
	with web connected with four or more fasteners per line in the direction of loading	$U = 0.70$	-
8	Single and double angles.	$U = 0.80$	-
	(If U is calculated per Case 2, the larger value is permitted to be used.)	with three fasteners per line in the direction of loading (with fewer than three fasteners per line in the direction of loading, use Case 2)	$U = 0.60$

B – overall width of rectangular HSS member, measured 90° to the plane of the connection, in. (mm); D – outside diameter of round HSS, in. (mm); H – overall height of rectangular HSS member, measured in the plane of the connection, in. (mm); d – depth of section, in. (mm); for tees, d – depth of the section from which the tee was cut, in. (mm); l – length of connection, in. (mm); w – width of plate, in. (mm); \bar{x} – eccentricity of connection, in. (mm).

$l = \frac{l_1 + l_2}{2}$, where l_1 and l_2 shall not be less than 4 times the weld size.

Fuente: Tomado del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC 360, 2016).

2.2.10.8. Diseño de miembros a compresión:

La resistencia de diseño en compresión $\Phi_c P_n$, o la resistencia admisible en compresión P_n/Ω_c , se determinará usando los factores de la ecuación (2.12):

$$\Phi_c = 0,90(LRFD) \quad \Omega_c = 1,67ASD \quad \dots \quad (2.12)$$

La resistencia de compresión nominal P_n , es el valor más bajo obtenido de acuerdo a los estados límites que aplican pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por flexo-torsión. Ver tabla 2.3

En esta tesis se desarrolló el diseño a compresión solo de tubos estructurales (circulares o rectangulares), de elementos esbeltos y no esbeltos, es por eso que según la tabla 2.3 solo se consideran en el diseño los estados límite de pandeo flexionante y pandeo local.

2.2.10.8.1. Longitud efectiva:

El factor de longitud efectiva K , para calcular la esbeltez del miembro (KL/r) se determina de acuerdo a la tabla 2.4.

Dónde:







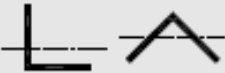

L = Longitud del miembro sin arriostramiento lateral (en in o mm).

r = Radio de giro (en in o mm).

Para miembros diseñados sólo en compresión, se recomienda que la relación de esbeltez efectiva " KL/r " no exceda de 200.

Esta tesis se aplicó a armaduras planas, en la cual cada uno de sus miembros se puede idealizar como simplemente apoyados, es por eso que el valor de K según la tabla 2.4 es 1 para el diseño de todos sus miembros.

Tabla 2.3: Tabla de selección para la aplicación de las secciones del capítulo E de la guía AISC 360-2016.

TABLE USER NOTE E1.1 Selection Table for the Application of Chapter E Sections				
Cross Section	Without Slender Elements		With Slender Elements	
	Sections in Chapter E	Limit States	Sections in Chapter E	Limit States
	E3 E4	FB TB	E7	LB FB TB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E6 E3 E4	FB FTB	E6 E7	LB FB FTB
	E5		E5	
	E3	FB	N/A	N/A
Unsymmetrical shapes other than single angles	E4	FTB	E7	LB FTB

FB = flexural buckling, TB = torsional buckling, FTB = flexural-torsional buckling, LB = local buckling, N/A = not applicable

Fuente: Tomado del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC 360 2016).

Tabla 2.4: Valores aproximados del factor de longitud efectiva (k).

<p style="text-align: center;">TABLE C-A-7.1 Approximate Values of Effective Length Factor, K</p>						
Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code	<ul style="list-style-type: none"> Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free 					

Fuente: Tomado del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC 360 2016).

2.2.10.8.2. Pandeo flexionante de miembros sin elementos esbeltos:

Este ítem se aplica a miembros que están a compresión uniforme de elementos no esbeltos como se establece en la sección 2.2.10.2.

La resistencia a compresión nominal P_n , se determina en base al estado límite del pandeo flexionante y se calculará aplicando la ecuación (2.13):

$$P_n = F_{cr}A_g \quad \dots \quad (2.13)$$

El esfuerzo crítico (F_{cr}), se determina con las ecuaciones (2.14) y (2.15):

– Cuándo: $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ ó $\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$:

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad \dots \quad (2.14)$$

– Cuándo: $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ ó $\frac{F_y}{F_e} > 2.25$:

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad \dots \quad (2.15)$$

Dónde:

Ag: Área bruta del miembro (en in^2 o mm^2).

K: Factor de longitud efectiva.

r: Radio de giro (en in o mm).

L: Longitud del miembro sin arriostamiento lateral (en in o mm).

E: Módulo de elasticidad del material (en ksi o Mpa).

Fy: Esfuerzo de fluencia del material (en ksi o Mpa).

Fe: Esfuerzo de pandeo elástico, también se le conoce como el esfuerzo critico de Euler (en ksi o Mpa) y se calcula con la ecuación (2.16):

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \dots \quad (2.16)$$

2.2.10.8.3. Miembros con elementos esbeltos:

Este ítem se aplica a miembros que están a compresión uniforme de elementos esbeltos como se establece en la sección 2.2.10.2.

La resistencia a compresión nominal P_n , se determina en base a los estados límites del pandeo flexionante, torsional y flexo-torsional y se calculará aplicando la ecuación (2.17):

$$P_n = F_{cr}A_g \quad \dots \quad (2.17)$$

El esfuerzo crítico (F_{cr}), se determina con las ecuaciones (2.18) y (2.19):

– Cuándo: $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $\frac{QF_y}{F_e} \leq 2.25$:

$$F_{cr} = \left[Q 0.658 \frac{QF_y}{F_e} \right] F_y \quad \dots \quad (2.18)$$

– Cuándo: $\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{QF_y}}$ ó $\frac{QF_y}{F_e} > 2.25$:

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad \dots \quad (2.19)$$

Donde:

F_e : Esfuerzo de pandeo elástico y se calcula usando la ecuación (2.16) para miembros con simetría simple y doble.

Q : Factor de reducción neto que toma en cuenta todos los elementos esbeltos en compresión y es igual a los siguientes valores:

- A 1,0 para miembros sin elementos esbeltos, como se define en la sección 2.2.10.2, para elementos en compresión uniforme.
- A $Q_s * Q_a$ para miembros con secciones de elementos esbeltos, como se define en la sección 2.2.10.2, para elementos en compresión uniforme.

Para secciones conformadas solamente por elementos esbeltos no rigidizados, $Q = Q_s$ ($Q_a = 1,0$). Para secciones conformadas solamente por elementos esbeltos rigidizados, $Q = Q_a$ ($Q_s = 1,0$). Para secciones conformadas por ambos elementos esbeltos no rigidizados y rigidizados, $Q = Q_s Q_a$

En esta tesis se trabajó solo con perfiles metálicos tubulares, en los cuales sus secciones solo tienen elementos rigidizados, por lo tanto $Q = Q_a$ ($Q_s = 1,0$).

2.2.10.8.3.1. Elementos esbeltos rigidizados:

El factor de reducción, Q_a , para elementos esbeltos rigidizados se define como la ecuación (2.20):

$$Q_a = \frac{A_e}{A} \quad \dots \dots (2.20)$$

Dónde:

A : Área seccional total del miembro (en in^2 o cm^2).

A_e = Suma de las áreas efectivas de las secciones basadas en el ancho efectivo reducido

b_e (en in^2 o cm^2).

El ancho efectivo reducido, b_e , se determina de la siguiente manera:

- Para elementos esbeltos en compresión uniforme, con $\frac{b}{t} \geq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f}}$, excepto para alas de tubos cuadrados y rectangulares de espesor uniforme se utiliza la ecuación (2.21):

$$b_e = 1,92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0,34}{\frac{b}{t}} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad \dots (2.21)$$

Dónde:

f se toma como F_{cr} con F_{cr} calculada con $Q = 1,0$.

- Para alas de elementos esbeltos de tubos cuadrados y rectangulares en compresión uniforme con $\frac{b}{t} \geq 1,40 \sqrt{\frac{E}{f}}$ se emplea la ecuación (2.22):

$$b_e = 1,92t \sqrt{\frac{E}{f}} \left[1 - \frac{0,38}{\frac{b}{t}} \sqrt{\frac{E}{f}} \right] \leq b \quad \dots (2.22)$$

Dónde:

$$f = P_n/A_e \quad \dots (2.23)$$

Nota: En vez de calcular $f = P_n/A_e$, que requiere iteración, f puede ser tomada igual a F_y .

Esto resulta en una estimación levemente conservadora en la capacidad de la columna

En esta tesis se consideró que f es igual a F_y .

- Para tubos circulares cargados axialmente, cuando $0,11 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} < 0,45 \frac{E}{F_y}$:

$$Q = Q_a = \frac{0,038E}{F_y \frac{D}{t}} + \frac{2}{3} \quad \dots (2.24)$$

Donde:

D = Diámetro exterior (en in o mm).

t = Espesor de pared (en in o mm).

2.2.10.9. Deflexión de elementos de armaduras metálicas:

Para el cálculo de las deflexiones de cada elemento se considera lo establecido en el artículo 25 de la Norma Técnica de edificaciones E0.20 – Cargas y dicho artículo menciona lo siguiente: Excepto en los casos expresamente cubiertos en las normas propias de los diversos materiales estructurales, la deflexión de cualquier elemento estructural no excederá los valores indicados en la tabla 2.6, excepto cuando soporte paneles de vidrio, en cuyo caso se tomará en cuenta lo siguiente: Excepto en los casos expresamente cubiertos en las Normas propias de los diversos materiales estructurales, la deflexión para carga viva más la parte correspondiente a las deflexiones diferidas, de elementos estructurales que soportan paneles de vidrio no excederá en ningún caso 20mm (N.T.E. E0.20 2006).

Tabla 2.5: Deflexiones máximas para elementos estructurales.

TIPO DE ELEMENTO	FLECHA PRODUCIDA POR LA CARGA VIVA	FLECHA PRODUCIDA POR LA CARGA VIVA MÁS LAS FLECHAS DIFERIDAS
Pisos	L/360	L/240*
Techos	L/180	
L: Luz del elemento. Para volados se tomará como L, el doble de la longitud del elemento.		
Flecha diferida: Se establece en función de cada material de acuerdo a su norma respectiva. La flecha diferida se calculará para las cargas permanentes más la fracción de sobrecarga que actúa permanentemente.		
* No aplicable a estructuras metálicas		

Fuente: Adaptado de la Norma Técnica de Edificaciones (N.T.E. E0.20 2016)

En esta tesis se reemplazará el término deflexión máxima por deflexión límite y se utilizará la relación L/180.

2.3. Definición de términos básicos

- 2.3.1. Modelado Paramétrico:** Consiste en generar y controlar todos los elementos de diseño a través de un software específico, dando paso a la construcción y optimización de geometrías sin límite de complejidad (Valdiviezo 2014:25).
- 2.3.2. Optimización estructural:** en una estructura se tienen que determinar objetivos que pueden ser, por ejemplo, el peso o rigidez de la estructura. Una evaluación numérica de un determinado objetivo es posible a través de una función objetivo, f , que determina la bondad de la estructura. Por supuesto, la optimización debe realizarse dentro de restricciones; de lo contrario, es un problema sin una solución bien definida (Christensen y Klarbring 2008).
- 2.3.3. Algoritmos genéticos:** Un algoritmo es una serie de pasos que describen el proceso de búsqueda de una solución a un problema concreto. Y un algoritmo genético es cuando se usan mecanismos que simulan los de la evolución de las especies de la biología para formular esos pasos. Es una técnica metaheurística de optimización inspirada en la idea de que el que sobrevive es el que está mejor adaptado al medio, es decir la misma que subyace a la teoría de la evolución que formuló Charles Darwin y que combina esa idea de la evolución con la genética (Núñez 2019).
- 2.3.4. Computación evolutiva:** La computación evolutiva se refiere al “estudio de los fundamentos y aplicaciones de ciertas técnicas heurísticas basadas en los principios de la evolución natural” (Tomassini 1995: 87).
- 2.3.5. Guide:** Llamado también programa ejecutable. Es un patrón o modelo creado con un lenguaje de programación en un cierto programa con el fin de calcular o encontrar algo específico. Un guide representa un método muy eficaz de generar códigos ocultando la complejidad de éstos y mostrando al usuario lo básico o necesario mediante interfaces. Además, agiliza el trabajo, debido a que el usuario solamente cambiará algunos parámetros o valores y obtendrá lo que está buscando en el menor tiempo posible (Colunche 2019: 55).

CAPITULO III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Ubicación geográfica de la investigación:

La investigación se realizó en:

- País : Perú
- Departamento : Cajamarca
- Provincia : Cajamarca
- Distrito : Cajabamba.

3.2. Época de la investigación:

La investigación se desarrolló desde el mes de noviembre del 2020 hasta el mes de agosto del 2021.

3.3. Metodología de la investigación

3.3.1. Tipo y diseño de la investigación.

- El tipo de investigación según el propósito de investigación es **aplicada**, ya que al utilizar el conocimiento de anteriores investigadores, se da una solución a la necesidad de obtener estructuras óptimas (menor peso) aplicando nuevas técnicas de optimización.
- El tipo de investigación según el enfoque de investigación es **cuantitativa**, porque con los datos numéricos que obtenemos damos una respuesta a la hipótesis planteada.
- El tipo de investigación según el ámbito de investigación es **no experimental**, puesto que solo nos basamos en la observación de las variables y subvariables para llegar a las conclusiones.
- El tipo de investigación según el periodo de ejecución de la investigación es **transversal**, ya que esta tesis se ha desarrollado en un periodo único, ya definido.
- El tipo de investigación según el alcance de la investigación es **descriptiva**, porque se describe de manera objetiva el proceso de desarrollo del guide para el modelamiento y la optimización de armaduras metálicas espaciales.

El diseño de la investigación es documental, puesto que, en base al análisis de información tomada de otros investigadores, se ha podido desarrollar el guide propuesto en esta tesis utilizando un nuevo proceso de diseño estructural de coberturas metálicas con el fin de optimizar el peso.

3.3.2. Población de estudio.

La población está constituida por las coberturas metálicas.

3.3.3. Muestra.

La muestra está formada por cuatro modelos de coberturas espaciales: arcos de celosía tipo Warren con montantes consecutivas y las viguetas tipo Warren simple con sección triangular conformadas por perfiles tubulares circulares.

3.3.4. Unidad de análisis:

La unidad de análisis corresponde a las armaduras metálicas espaciales o tridimensionales.

3.3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

3.3.5.1. Técnicas:

Se empleó las siguientes técnicas:

- Análisis documental: Se trabajó en base al análisis de información de fuentes documentales (tesis, libros, manuales) tomada de otros investigadores para desarrollar el guide propuesto en esta tesis utilizando un nuevo proceso de diseño estructural de coberturas metálicas conformadas por armaduras espaciales.
- Observación estructurada: Se observó cómo va variando el peso, los ratios, las deflexiones de cada una de las coberturas metálicas con la manipulación de los parámetros de diseño para que posteriormente se registre la información en tablas.
- Análisis comparativo. Se comparó los resultados de diseño de los 4 modelos de coberturas metálicas sin optimizar con sus respectivas coberturas metálicas optimizadas. Además, se diseñó un arco de celosía sin optimización en el software SAP 2000 y de esa manera poder realizar el análisis y discusión de resultados.

3.3.5.2. Instrumentos:

Se utilizó los siguientes instrumentos en base a las técnicas empleadas:

- Fichas de registro de datos
- Excel
- Software Rhinoceros 3D versión 6
- Software Grasshopper, complemento de Rhinoceros 3D.
- Software Karamba y Galápagos, complementos de Grasshopper.
- Software SAP 2000 versión 21.2.0.

3.4.Procedimiento de la investigación.

Se desarrollará el guide o programa ejecutable, realizando en primer lugar la programación fuente, siguiendo el nuevo proceso de diseño estructural. Para poner en funcionamiento a la guide se propone un ejemplo aplicativo el cual consta de cuatro casos ficticios para el diseño de coberturas metálicas de campos deportivos, cada uno de estos casos se los hará pasar por dos procesos: primero, modelamiento y diseño sin optimización, a la vez se escogerá un arco de celosía y se lo modelará y diseñará en el software comercial más conocido SAP 2000 para contrastar y verificar los resultados obtenidos en el guide creado. Segundo, optimización del peso de cada una de las coberturas utilizando el plugi-in Galápagos. Por último, se comparan los resultados sin optimización y con optimización y se analizan los porcentajes de los pesos optimizados.

3.4.1. Procedimiento de la programación fuente.

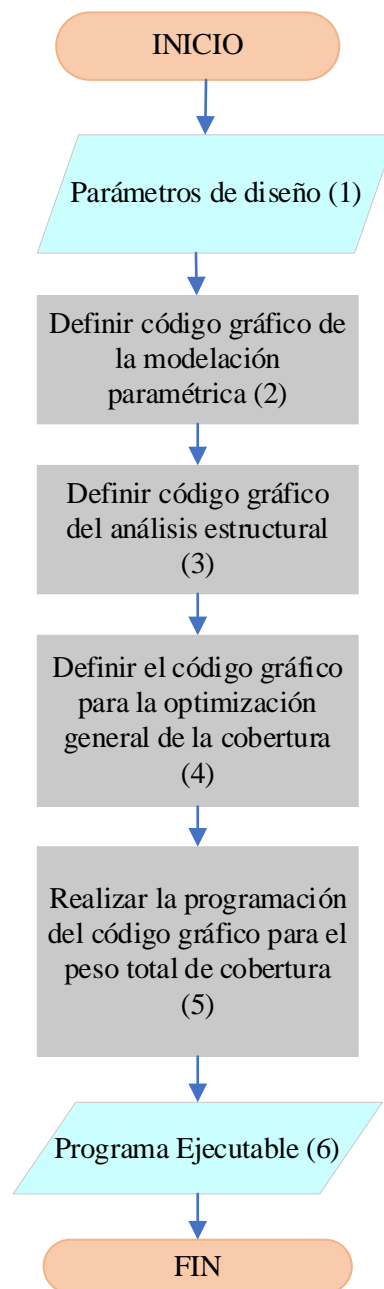


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de creación del guide propuesto.

Fuente: Adaptado de Colunche 2019.

(1) **Parámetros de diseño**, son los datos de entrada que permitirán modelar la cobertura metálica, éstos son: (ver Figura 3.2)

- Las dimensiones del terreno a techar.

- Características geométricas del arco de celosía (flecha, peralte, número de segmentos de brida, número de espacios que separan a los arcos, ancho) y viguetas (peralte, numero de segmentos, ancho).
- Datos de las cargas actuantes (carga de panel o cubierta, carga auxiliar, carga viva en azotea, carga de nieve, carga de sismo).
- Otros datos (altura de columna, velocidad del viento a la altura de 10 m, longitud entre apoyos de calamina, tensión última y tipo de soldadura).

(2) **Definir código gráfico de la modelación paramétrica,** (ver *Figura 3.3*) en este paso se utilizan los componentes de Grasshopper para ir definiendo los elementos tanto para los arcos de celosías (brida superior, brida inferior, diagonales izquierda y derecha, montantes, enlaces superior o inferior) y para las viguetas (brida superior, brida inferior, diagonales izquierda y derecha). En un primer momento estos elementos se definen como líneas. Además, se define la cubierta como una membrana.

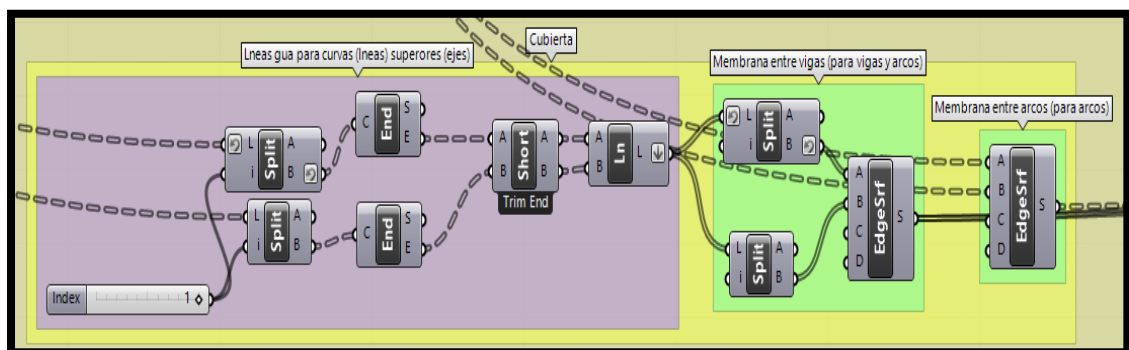


Figura 3.4. Código gráfico para definir cubierta o membrana de la cobertura metálica.

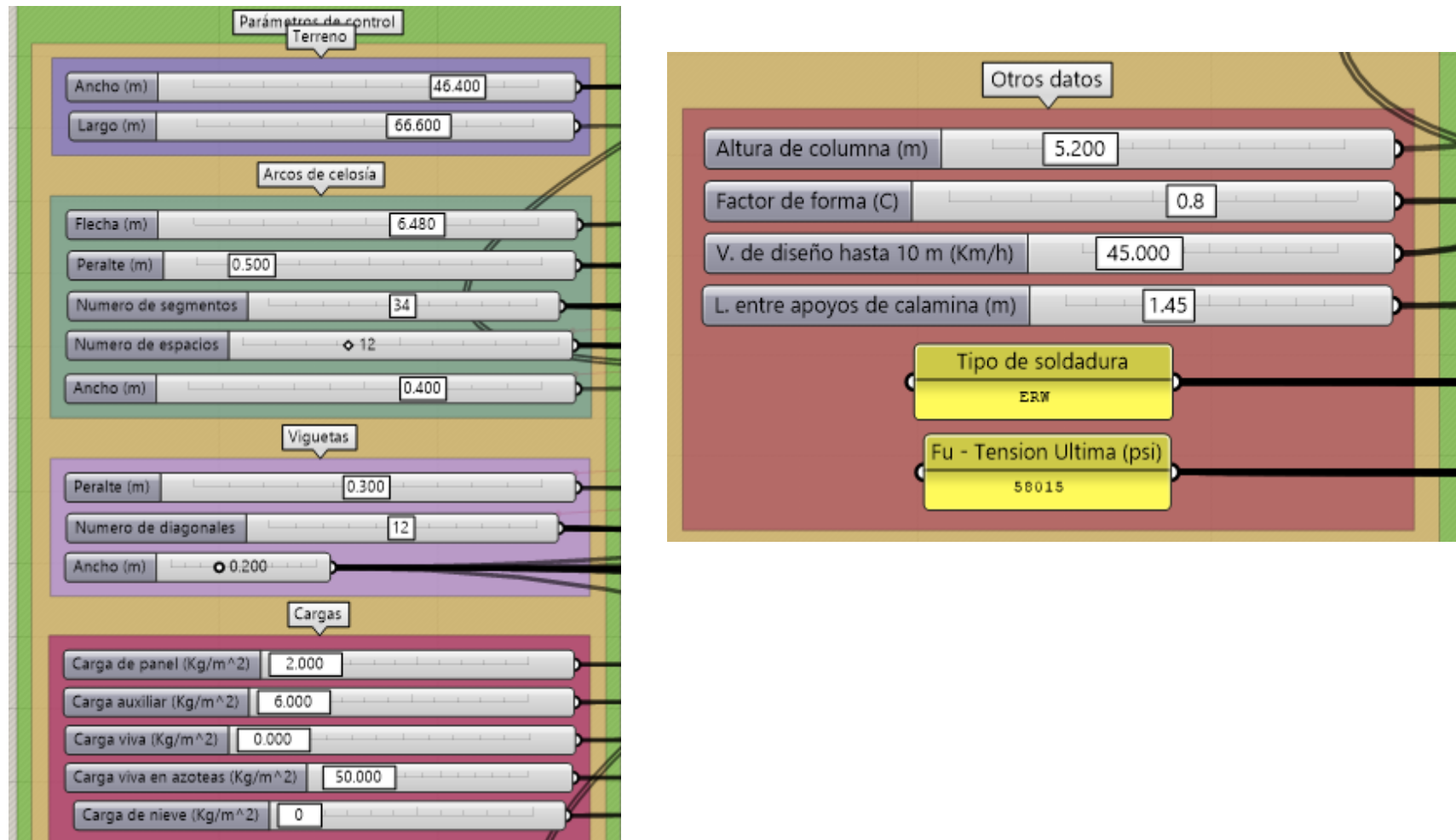


Figura 3.2. Definición de los parámetros de control para el modelamiento de la cobertura metálica.

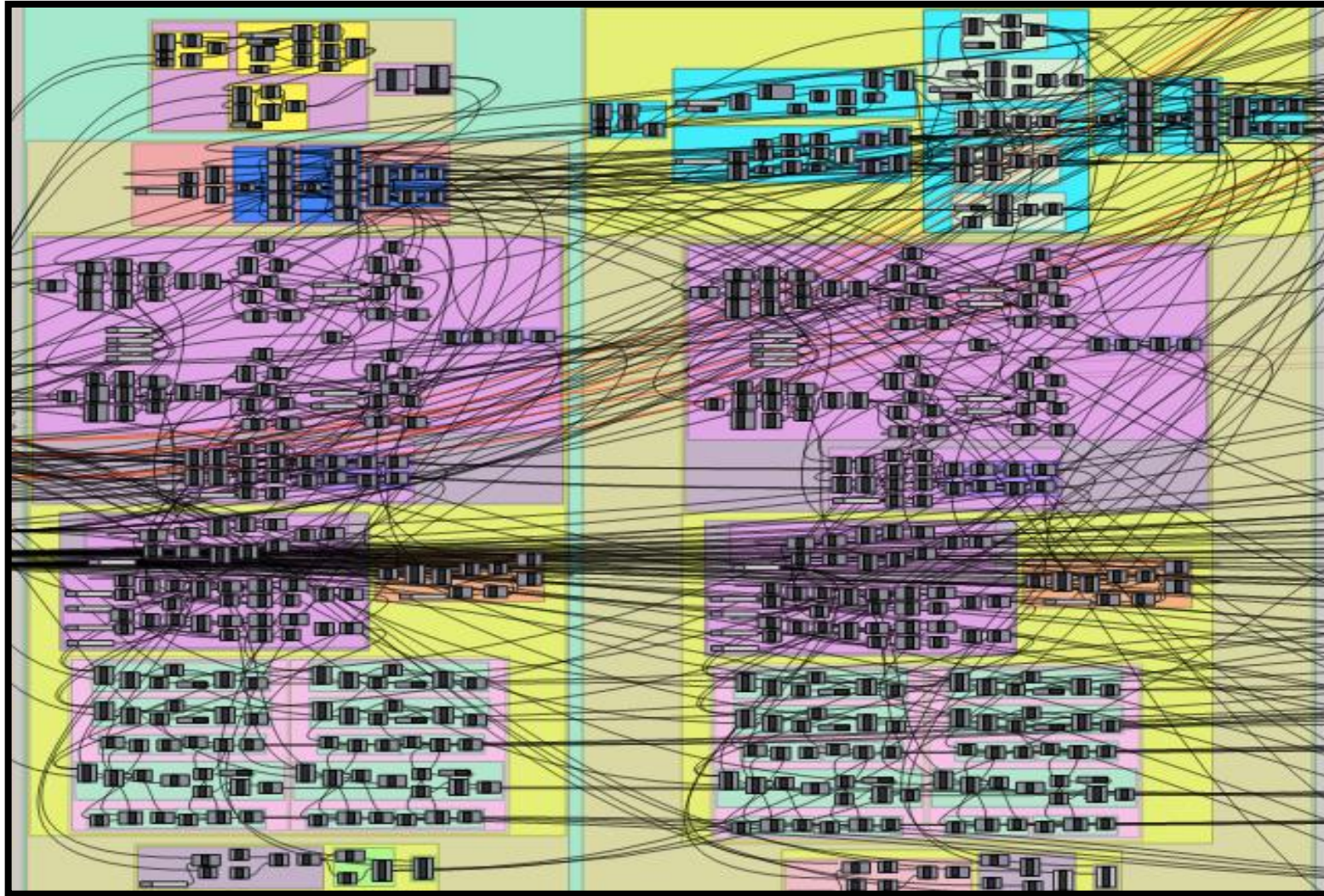


Figura 3.3. Modelación paramétrica de toda la cobertura (arcos de celosía, viguetas y cubierta).

(3) Definir código gráfico del análisis estructural, se trabaja con los componentes que ofrece el complemento Karamba dentro del entorno de Grasshopper. Primero se procede a convertir las líneas en elementos o miembros para poder realizar el diseño estructural. En esta etapa se definen: el material (A500 grado B circular con $f_y = 28.96 \text{ KN/cm}^2$), las articulaciones en los nodos y los apoyos (fijos), combinación de cargas según el método LRFD, las secciones transversales de cada elemento de arco de celosía y vigueta (Recalcando que se introdujeron secciones más pequeñas que las que el programa Karamba trae por defecto).

Estas secciones se han tomado de los catálogos de aceros Arequipa y Miromina. Para incrementar las secciones transversales primero se calcula las propiedades de las secciones como se muestra en el Anexo 1, luego estas propiedades se copian al archivo "CrossSectionValues_sortedforweight" (es un archivo en Excel que trae el programa karamba), después se guarda dicho archivo con otro nombre y con la extensión csv (guardar en otro lugar distinto a la carpeta de karamba, luego se elimina el archivo "CrossSectionValues" (es un archivo con la extensión csv de excel que trae el programa karamba), finalmente se copia el archivo con extensión csv a la carpeta de karamba y automáticamente el programa karamba reconocerá las nuevas secciones transversales (si no aparece las nuevas secciones se recomienda reiniciar la pc). El archivo "CrossSectionValues" y "CrossSectionValues_sortedforweight" se encuentran dando doble click izquierdo en el ícono de Karamba (este ícono aparece en el escritorio cuando se instala el programa).

Por último, se realiza el ensamblaje del modelo final para obtener el peso propio de la cobertura y se procede a realizar el análisis. Como resultados obtenemos: la deflexión máxima en la dirección "z" para el caso de carga de servicio, deflexión límite y las fuerzas axiales máximas y mínimas.

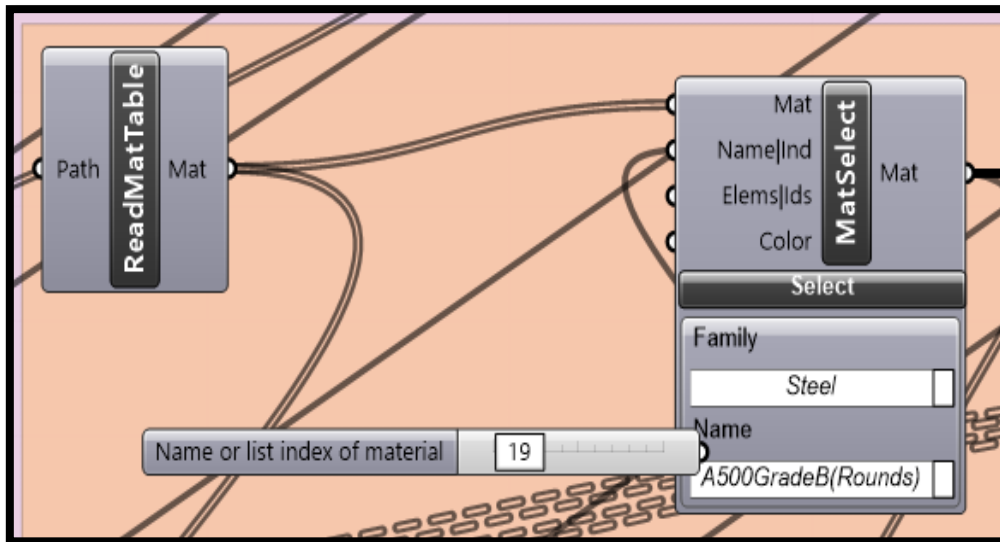


Figura 3.5. Código grafico para definir el material de los elementos del arco de celosía y viguetas.

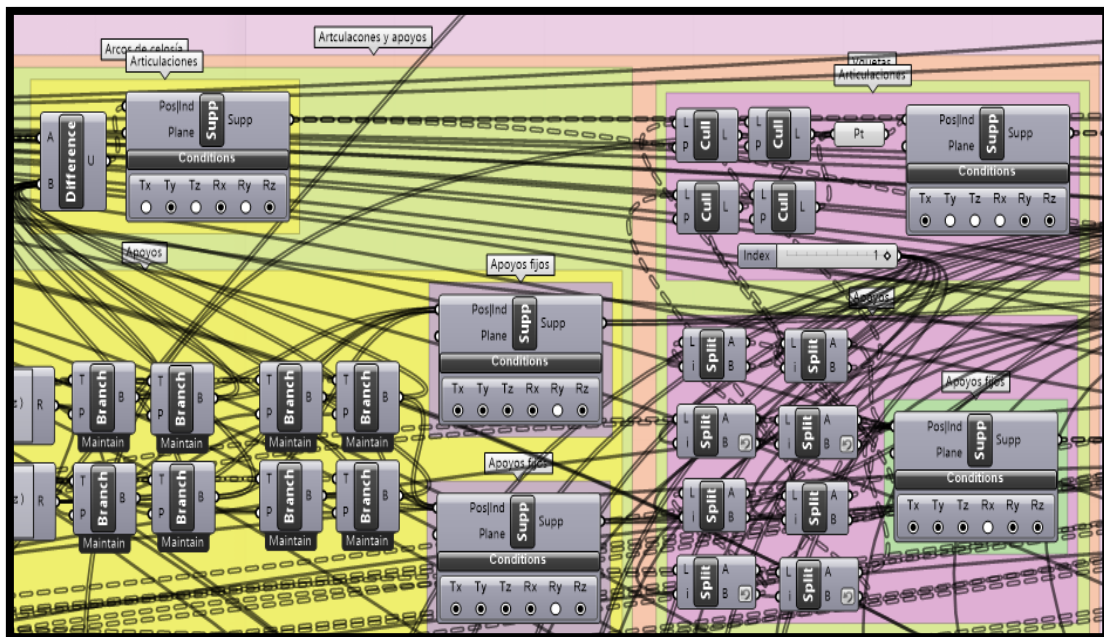


Figura 3.6. Código grafico para definir las articulaciones y apoyos

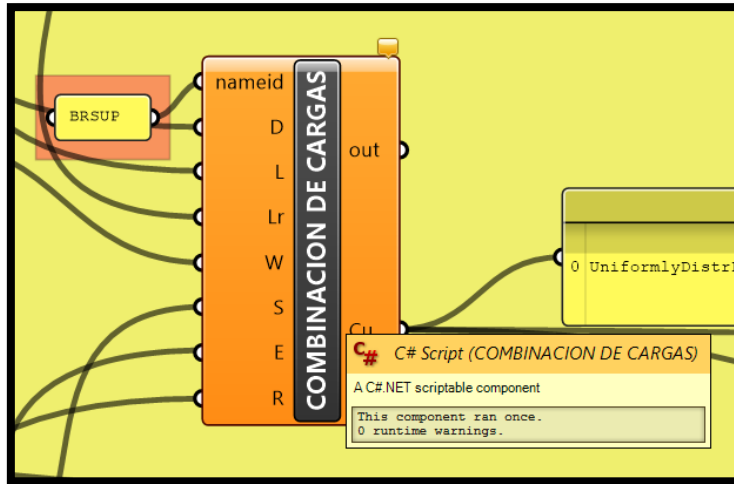


Figura 3.7. Componente Scriptable “Combinación de cargas” para el cálculo de la carga última.

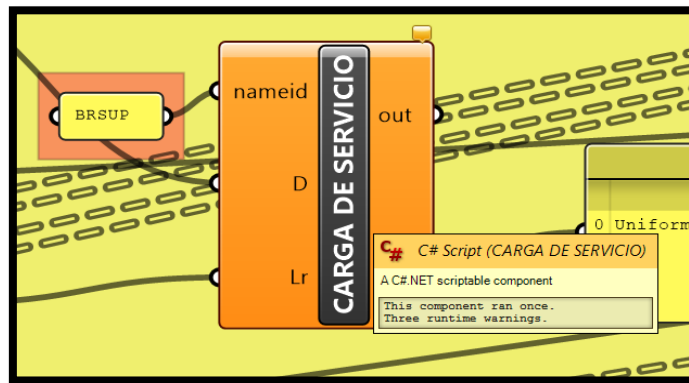


Figura 3.8. Componente Scriptable para el cálculo de la carga de servicio.

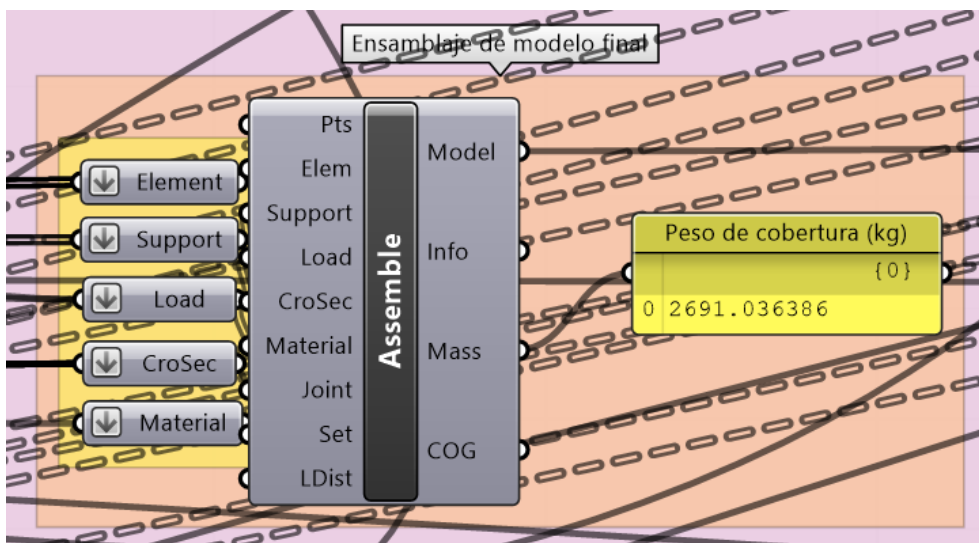


Figura 3.9. Código gráfico para el ensamblaje del modelo final.

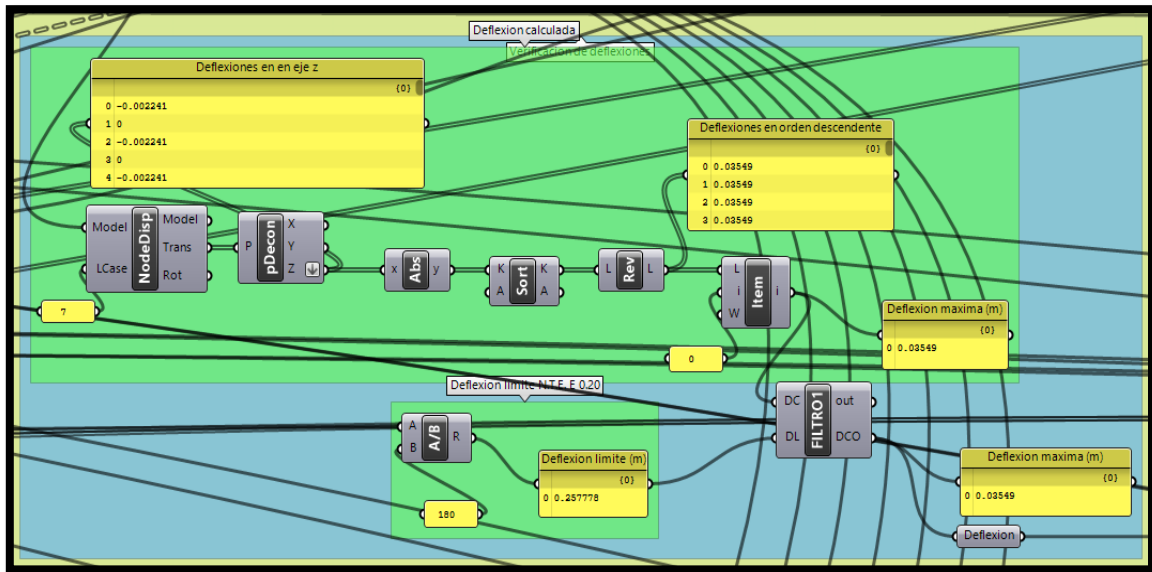


Figura 3.10. Código gráfico para el cálculo de las deflexiones máxima y límite.

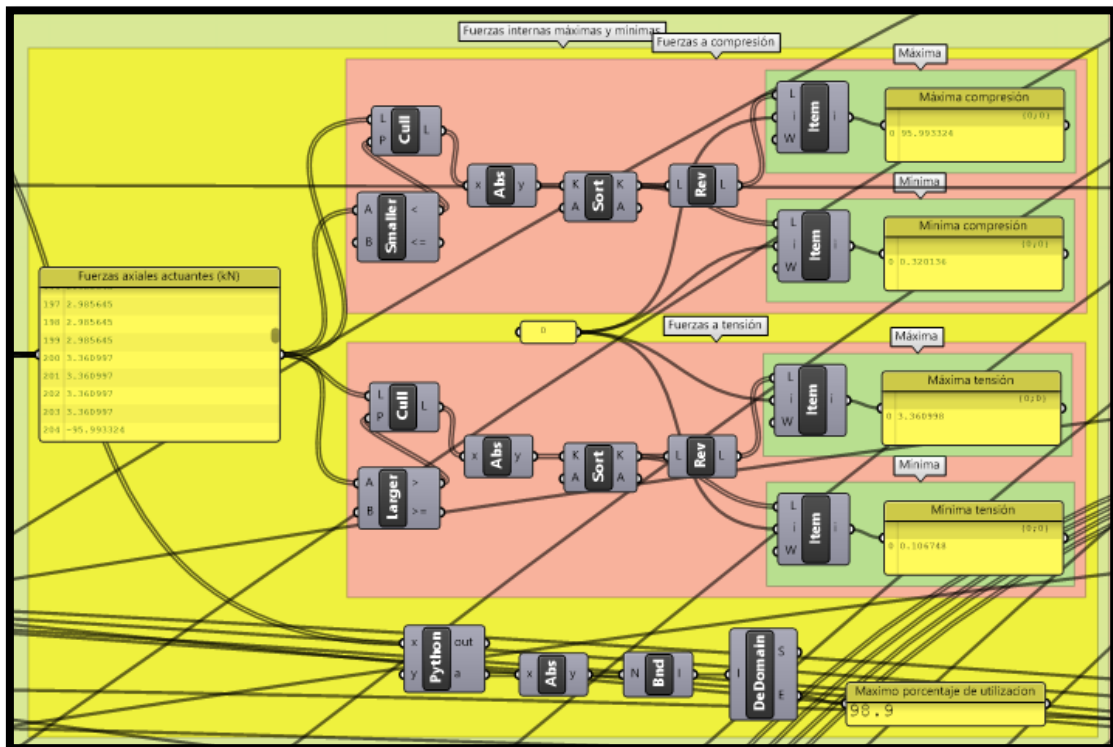


Figura 3.11. Código gráfico para el cálculo de las fuerzas axiales máximas y mínimas.

(4) **Definir código gráfico para la optimización general de la cobertura,** terminado el análisis estructural, se procede al diseño de los elementos o miembros según la AISC 360-16, para ello fue necesario utilizar los scripts son creados por Gonzáles (2018) con un lenguaje de programación a través del componente C Sharp “C#” o Phytton que son propios del programa grasshopper y son los que se detallan a continuación:



Figura 3.12. Script “AISC - TENSION - COMPRESION C”

Fuente: Tomado de Gonzales 2018:92.

El script “AISC - TENSION - COMPRESION C” diseña elementos o miembros (de una armadura) con secciones de perfiles tubulares (Hss) circulares a tensión o compresión (de acuerdo al caso) según la AISC 360-16.

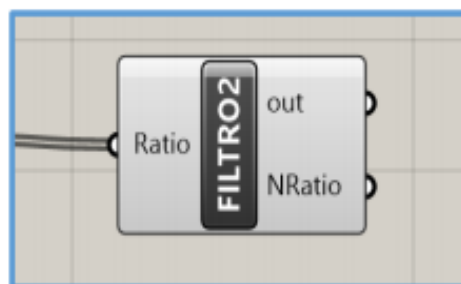


Figura 3.13. Script “FILTRO2”.

Fuente: Tomado de Gonzales 2018:95.

Lo que hace el script es, si existen ratios mayores a 1, entonces a esos ratios le asigna un valor de 1000, el cual es brindado por la salida “NRatio” del script, pero si los ratios son menores o iguales a 1, estos conservan su valor y también son brindados por la salida “NRatio”; esto es necesario para realizar la optimización de secciones transversales con Galápagos y así este no tome valores de ratio mayores a 1 (Gonzales 2018:95).

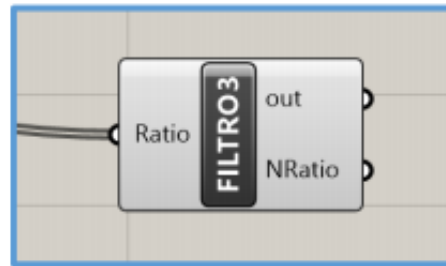


Figura 3.14. Script “FILTRO3”.

Fuente: Tomado de Gónzales 2018:96.

Este script tiene una entrada que es la entrada “Ratio” donde se ingresan los ratios de diseño demanda/capacidad de los elementos o miembros de armadura, brindados por el script “FILTRO2”, lo que hace el script es, si existe algún ratio igual a 1000, entonces a todos los ratios restantes se les asigna un valor de 1000, los cuales son brindados por la salida “NRatio” del script, pero si todos los ratios son distintos a 1000, entonces conservan su valor y también son brindados por la salida “NRatio”; esto es necesario para realizar la optimización de secciones transversales con Galápagos y así todos los ratios de diseño de los elementos o miembros adopten valores menores o iguales a 1 (Gonzales 2018:95-96).

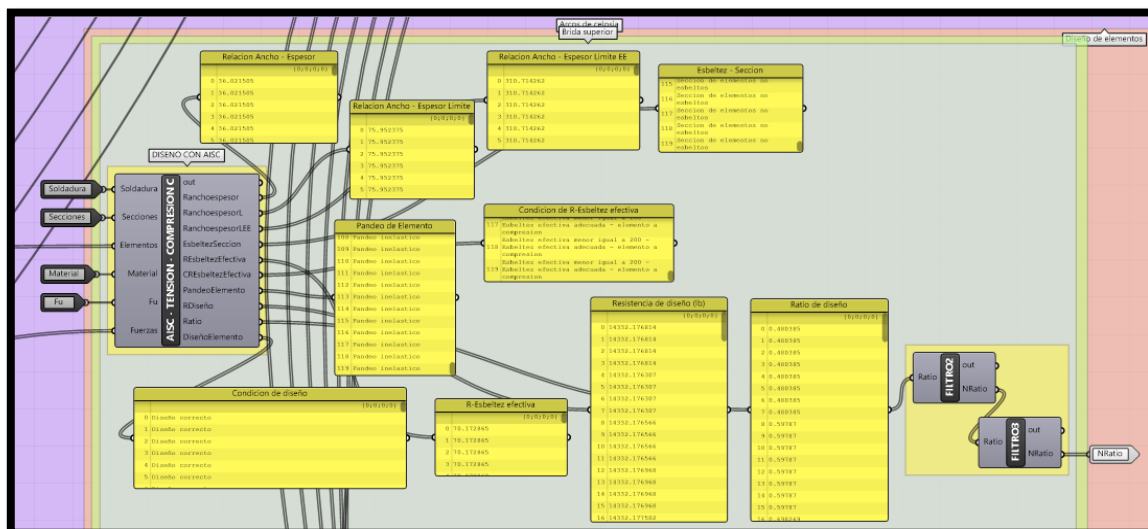


Figura 3.15. Código gráfico del diseño de cada elemento de los arcos de celosía y viguetas.

Completando todo el proceso de diseño según la AISC 360-16 explicado líneas arriba, se procede a definir el código gráfico para la Función de Optimización.

Se optimizará el tamaño para cada tipo de elemento (brida superior, diagonales derechas, brida inferior, diagonales izquierdas, montantes, enlaces superiores e inferiores), geometría y cantidad (número de arcos).

Así que, Galápagos tendrá como gnome o parámetros a: las secciones transversales de cada elemento de los arcos de celosía y viguetas, características geométricas de los arcos (peralte, ancho) y viguetas (peralte, número de diagonales) y Numero de espacios que nos indica el número de arcos.

La Función Objetivo o fitness viene dado por: $Pars + Dars + Abs(r1ars-1) + Abs(r2ars-1) + Abs(r3ars-1) + Abs(r4ars-1) + Abs(r5ars-1) + Abs(r6ars-1) + Abs(r7ars-1) + Pcs + Dcs + Abs(r1cs-1) + Abs(r2cs-1) + Abs(r3cs-1) + Abs(r4cs-1)$

Donde: Pars, representa al peso de los arcos.

Dars, representa a la deflexión máxima de los arcos.

$r1, \dots, r7$, ratios de diseño de los elementos que conforman el arco.

$Abs(r1ars-1), \dots, Abs(r7ars-1)$, función a minimizar o sea que Galápagos buscará que sea cero, por lo tanto los ratios tenderán a uno.

Pcs, representa al peso de las viguetas.

Dcs, representa a la deflexión máxima de las viguetas.

Luego de realizadas las conexiones del genome y del fitness, se procede a la optimización.

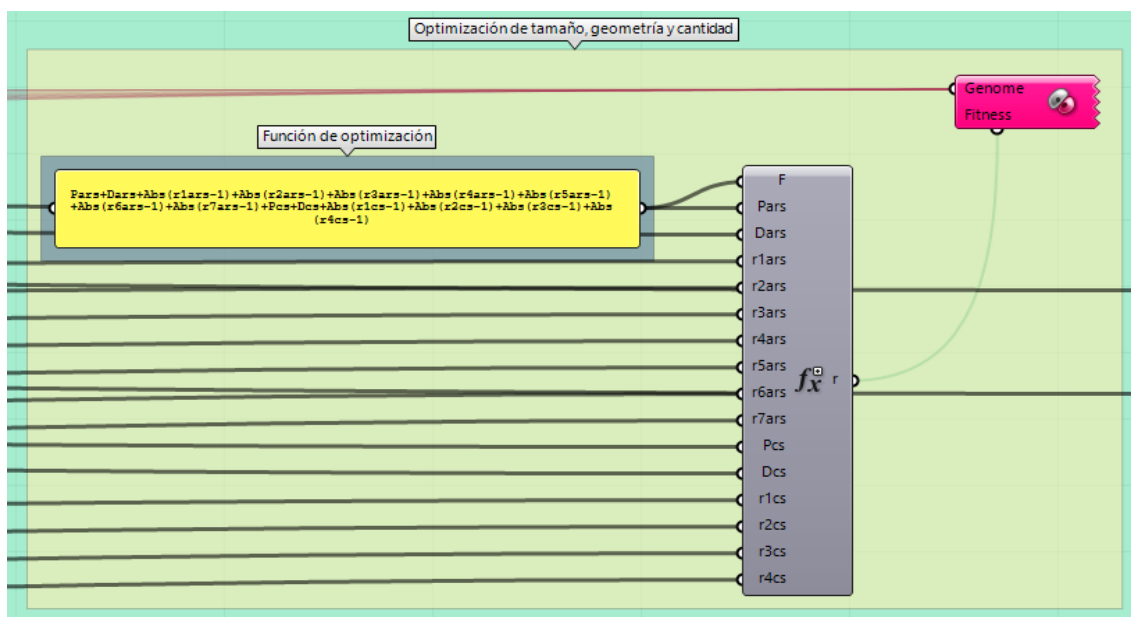


Figura 3.16. Código gráfico de la función de optimización y genome con el plugin Galápagos.

(5) Realizar la programación del código gráfico para el peso total de la cobertura.

En esta etapa se calcula el peso de toda la cobertura (arcos de celosía y viguetas espaciales) en kilogramos; para ello se han empleado componentes de Grasshopper.

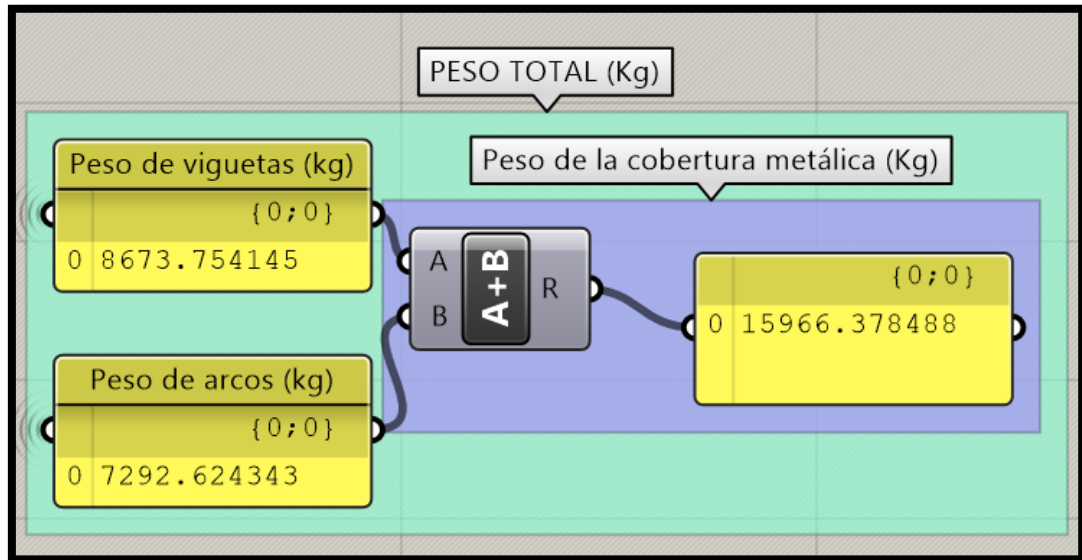


Figura 3.17. Código gráfico para calcular el peso total de la cobertura metálica.

(6) Programa Ejecutable

Todo el procedimiento explicado líneas arriba, queda plasmado en el guide, el cual en palabras de Colunche (2019:55) viene a ser un patrón o modelo creado con un lenguaje de programación en un cierto programa con el fin de calcular o encontrar algo específico. Un guide representa un método muy eficaz de generar códigos ocultando la complejidad de éstos y mostrando al usuario lo básico o necesario mediante interfaces. Además, agiliza el trabajo, debido a que el usuario solamente cambiará algunos parámetros o valores y obtendrá lo que está buscando en el menor tiempo posible.

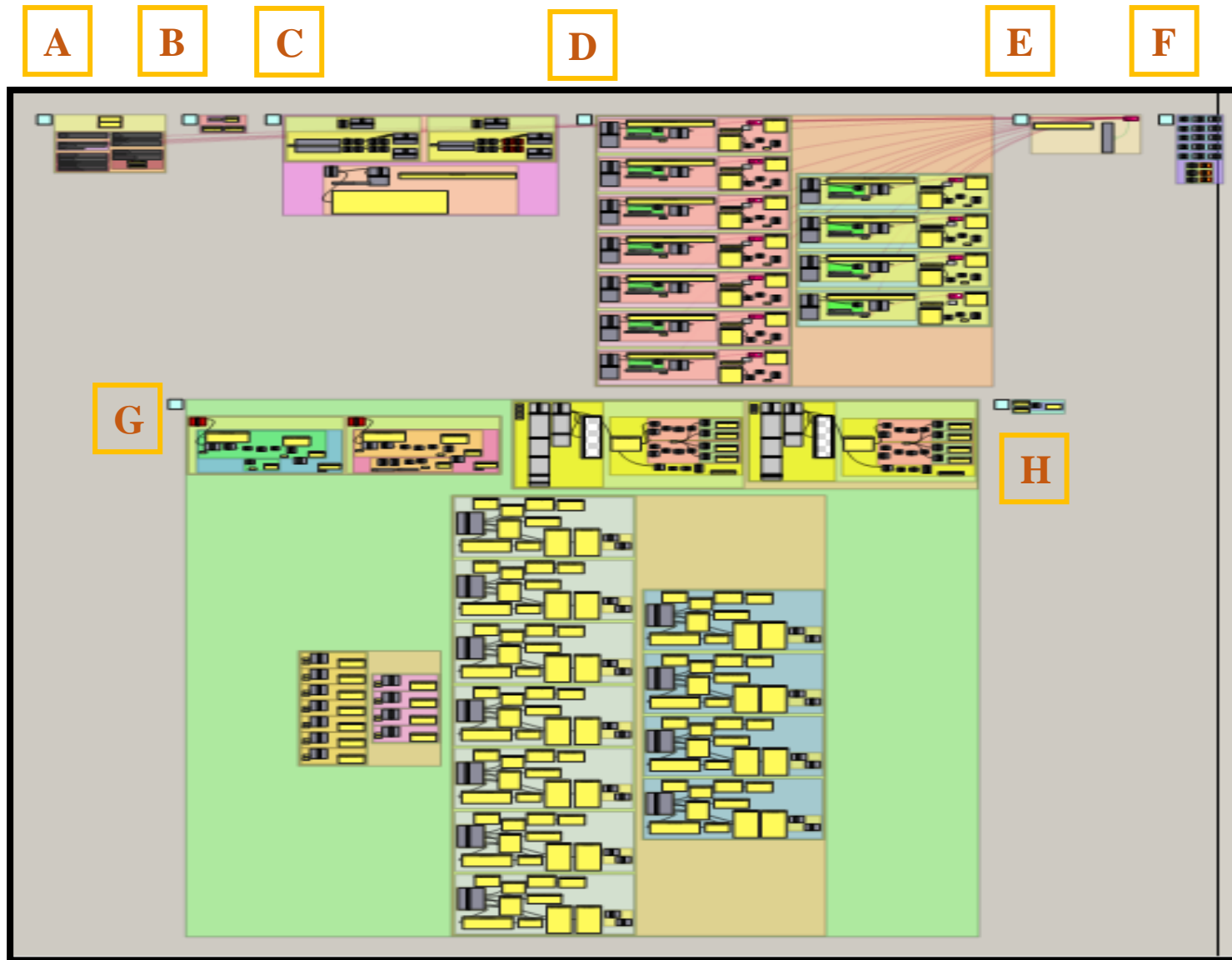


Figura 3.18. Resultado final: Programa ejecutable o guide.

3.4.2. Funcionamiento del Guide

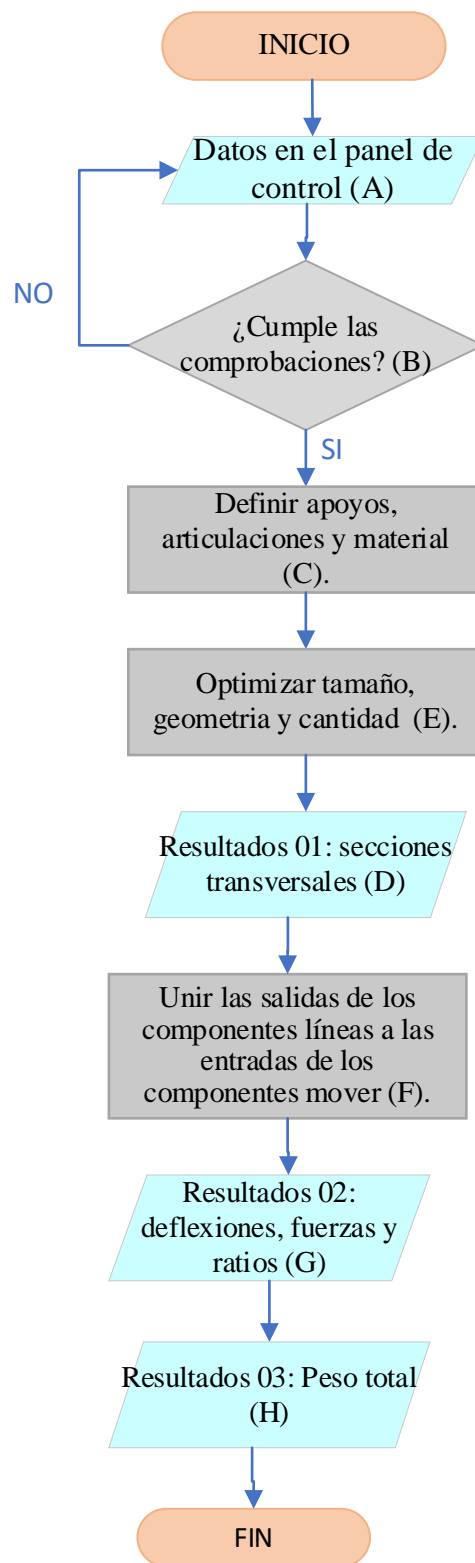


Figura 3.19. Diagrama de flujo sobre el funcionamiento del guide desarrollado.

Fuente: Adaptado de Colunche 2019.

A continuación, explicamos cada paso para la utilización del Guide, teniendo en cuenta lo ya explicado por Colunche (2019).

A) Datos en el panel de control: Se deben ingresar los parámetros que definirán a los arcos de celosía y viguetas tridimensionales. Contamos con parámetros tipo slider (características del terreno, arcos de celosía, viguetas, cargas y otros datos) y tipo panel (tipo de soldadura y F_u -tensión última).

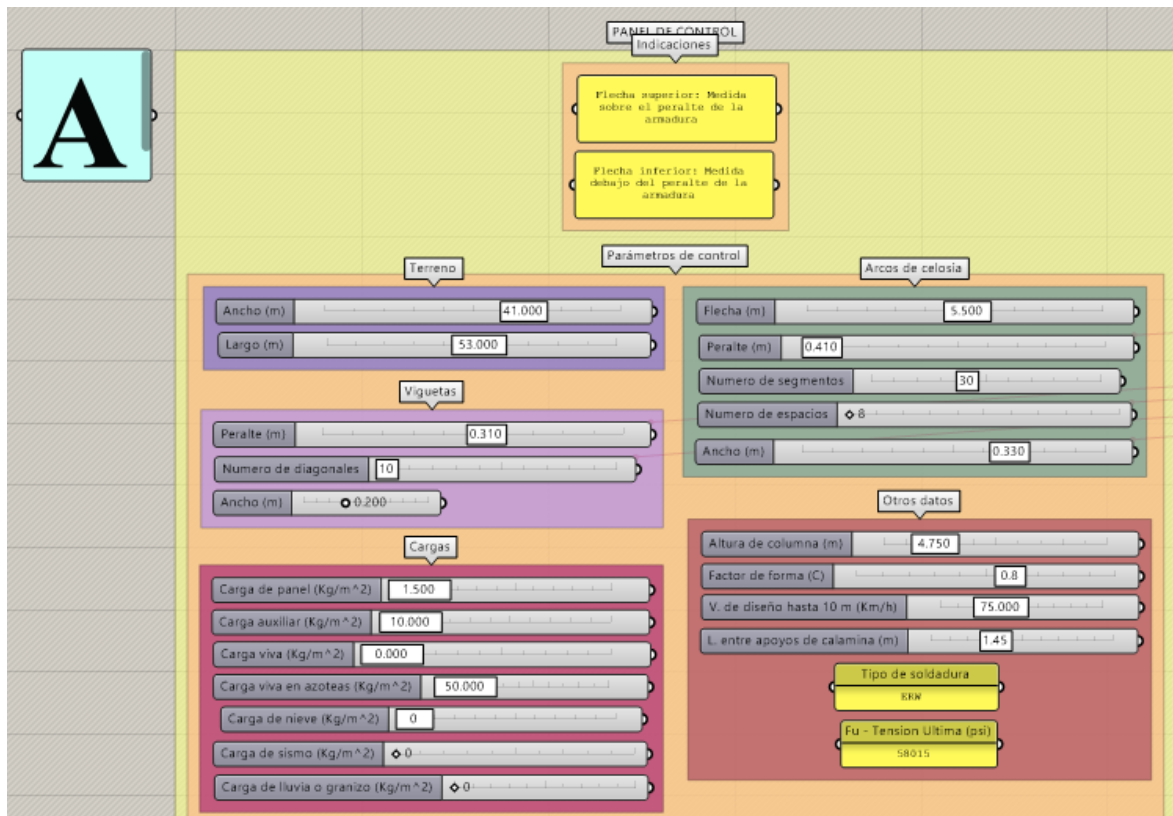


Figura 3.20. Panel de control del programa ejecutable o Guide.

Se puede modificar el rango de valores en cada parámetro y para ello se da doble click izquierdo ya sea en la parte que contiene el nombre del parámetro o en el número de fondo blanco y se abrirá una ventana. En esta ventana se cambian los valores del mínimo y máximo, los cuales se encuentran dentro del grupo Numeric domain y para ello se da doble click izquierdo en los números que aparecen al lado derecho del grupo domain.

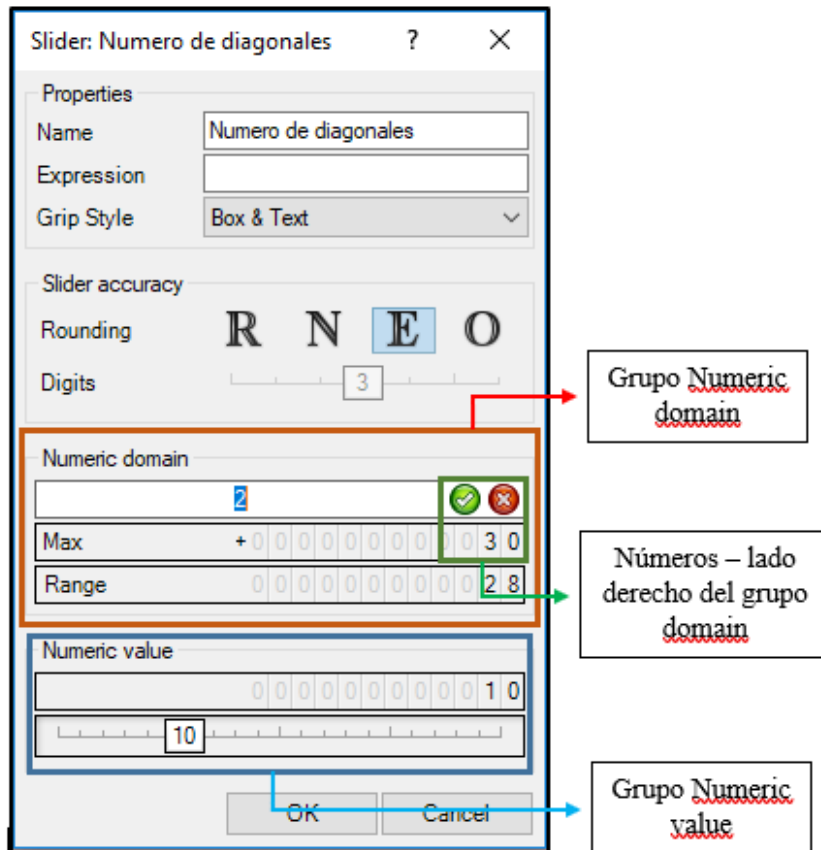


Figura 3.21. Ventana Slider para el control de parámetros.

Fuente: Adaptado de Colunche 2019.

Para modificar los valores de los parámetros tipo panel se da doble click izquierdo en cualquier parte del panel y se abrirá una ventana como la siguiente:

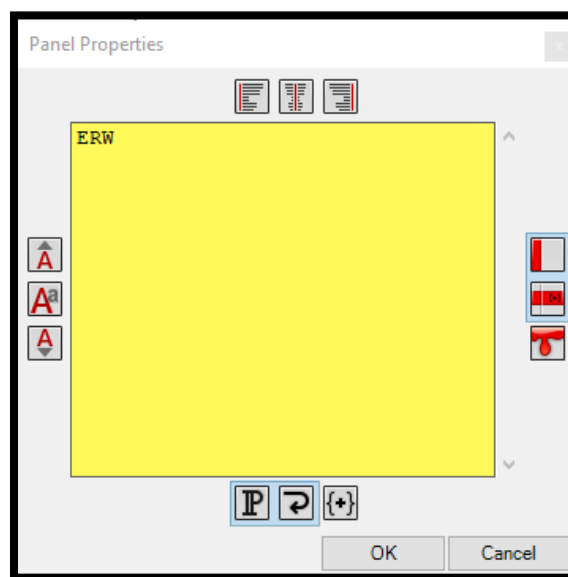


Figura 3.22. Ventana para el control de parámetros tipo Panel.

B) Comprobaciones: Se verifica que la pendiente de la cobertura cumpla con la norma E.020 – Cargas del Reglamento Nacional de Edificaciones y la longitud entre viguetas sea igual o parecido a la longitud entre apoyos de la calamina que se usará. Para conseguir que la condición sea verdadera (True), se tienen que ir modificando los parámetros: Flecha y número de segmentos del arco de celosía que se encuentran en el panel de control.

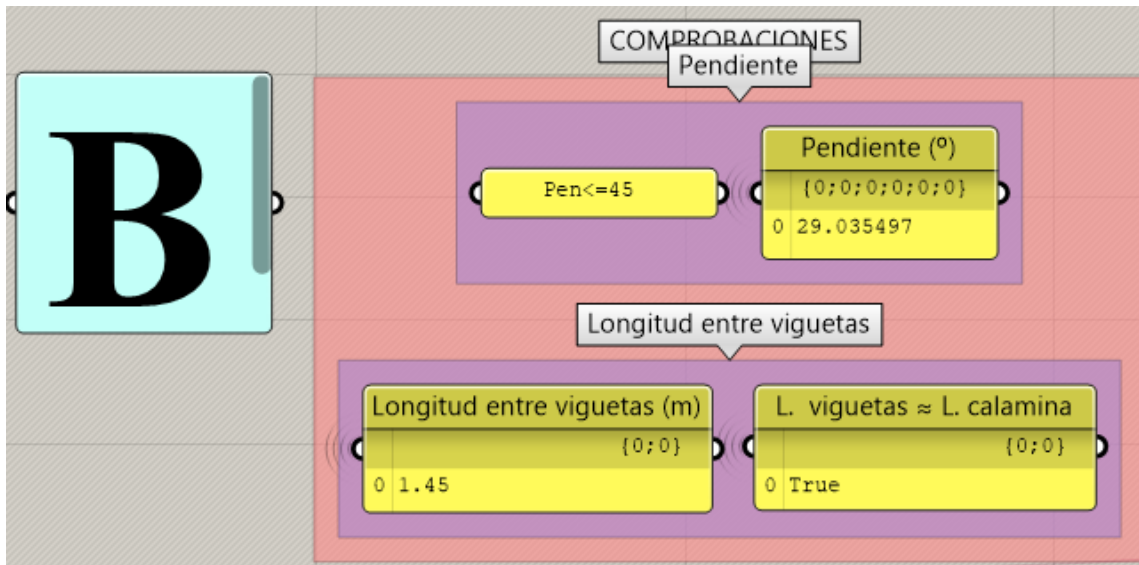


Figura 3.23. Comprobaciones a realizar en el programa ejecutable o Guide.

C) Definir apoyos, articulaciones y material:

Los apoyos fijos se establecen en los nodos extremos del arco de celosía, como se trata de una armadura tridimensional de sección rectangular tendremos cuatro apoyos fijos en el extremo izquierdo y derecho. Es por ello que vemos la conexión de cuatro cables a las entradas Pos|Ind. Además, se establecen las restricciones para un apoyo fijo: desplazamientos en x, y, z y rotación en x y z, permitiendo la rotación solo en el eje y (ver Figura 3.24).

En el caso de los nodos, dado que se trata de una armadura, se definen como articulaciones con las siguientes restricciones: desplazamiento en el eje y, rotación en x y z (ver Figura 3.24).

Tabla 3.1: Restricciones para un apoyo móvil y fijo.

	Restricciones					
	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
Apoyo móvil						
Apoyo fijo						

Nota. Los casilleros pintados son las restricciones activadas.

Fuente: Tomado de Colunche 2019: 132.

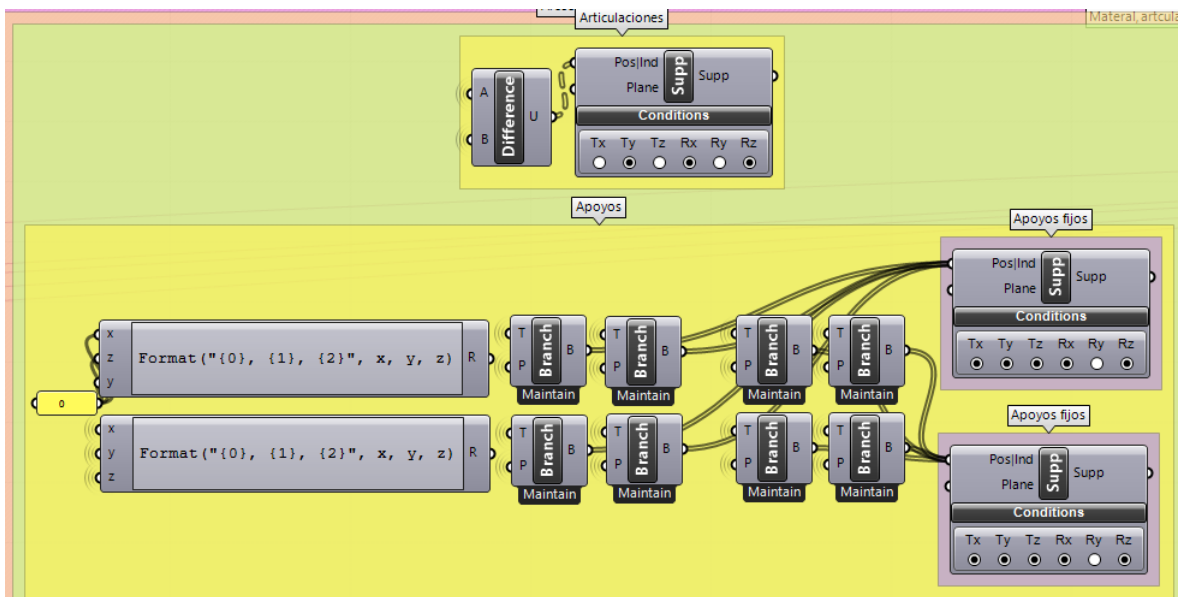


Figura 3.24. Definición de articulaciones y apoyos fijos para dos arcos de celosía en el programa ejecutable o Guide.

Para definir el material, se buscará en el panel inferior de color amarillo en donde se visualizan todos los tipos de acero con las que cuenta por defecto el programa. Se colocará el número de la lista en el componente tipo slider que tiene por nombre “Name or list index of material”, las características aparecerán en el componente MatSelect, en Family dirá “Steel”, y en Name A500 grade B (Rounds) que es el acero tubular circular con el que estamos trabajando en esta investigación (ver Figura 3.25).

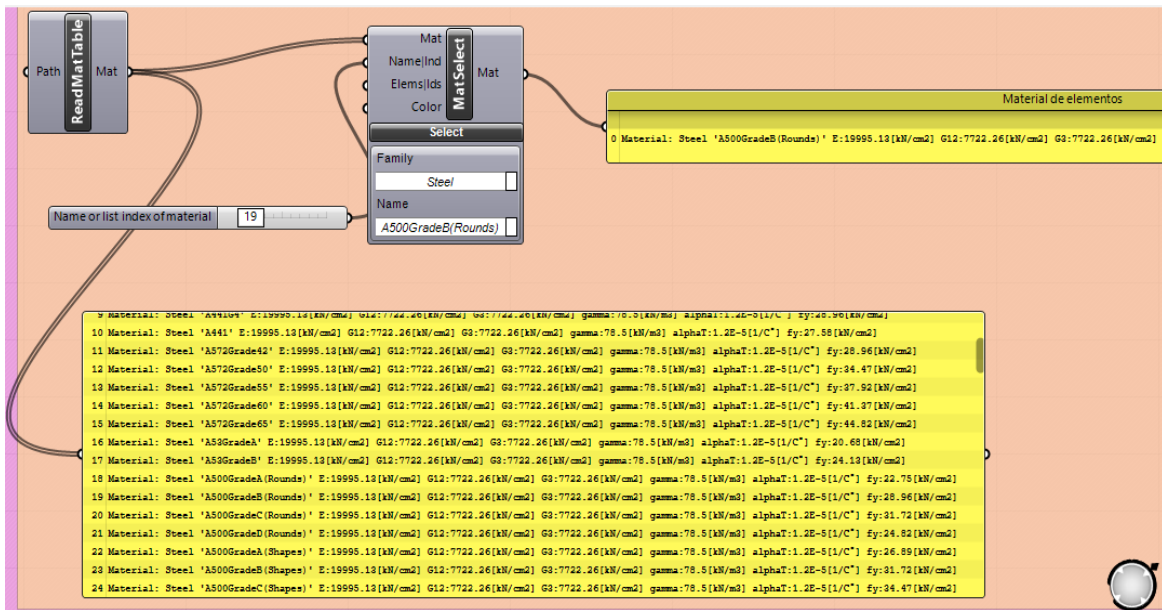


Figura 3.25. Definición del material de los elementos en el programa ejecutable o Guide.

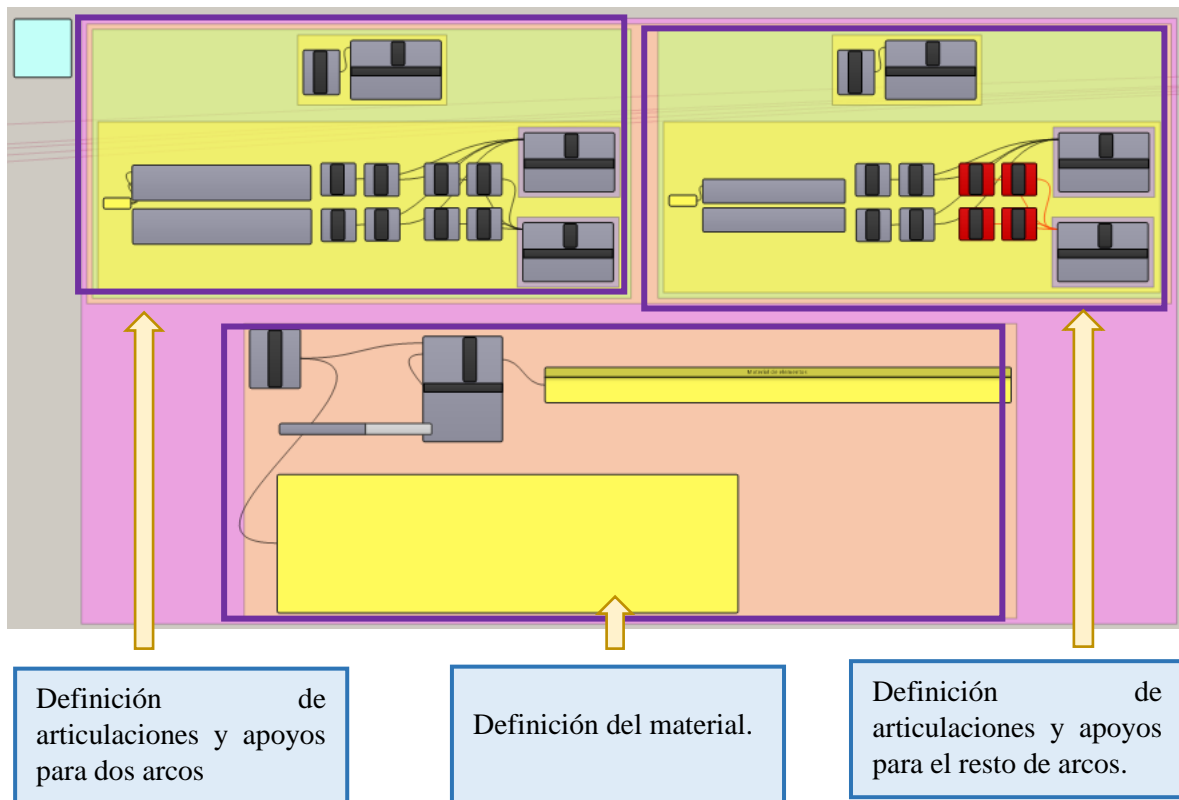


Figura 3.26. Definición de articulaciones, apoyos fijos y material para toda la cobertura en el programa ejecutable o Guide.

La razón por la que se trabaja primero con dos arcos es para no colgar al programa al momento de la optimización general, es por ello que se observan componentes de color rojo porque aún no se han hecho las conexiones de cables para toda la cobertura, dicho problema se resuelve en el paso F.

D) Secciones transversales de elementos: Este paso es uno de los resultados que te ofrece la optimización de tamaño que realiza Galápagos. Pero previamente a la optimización se tiene que elegir el país (Country), forma (shape) y la familia (family) del tipo de acero a utilizar. En el componente tipo slider que tiene por nombre “Index” se colocará el número 6 ya que esa es la cantidad de nuevas secciones que se han agregado y en el componente tipo slider que tiene por nombre “Name or list index of cross section” se tiene que elegir el número de la sección a utilizar que irá del 0 al 6. Este último paso es para definir las secciones transversales de los casos sin optimización del ejemplo que se plantea.

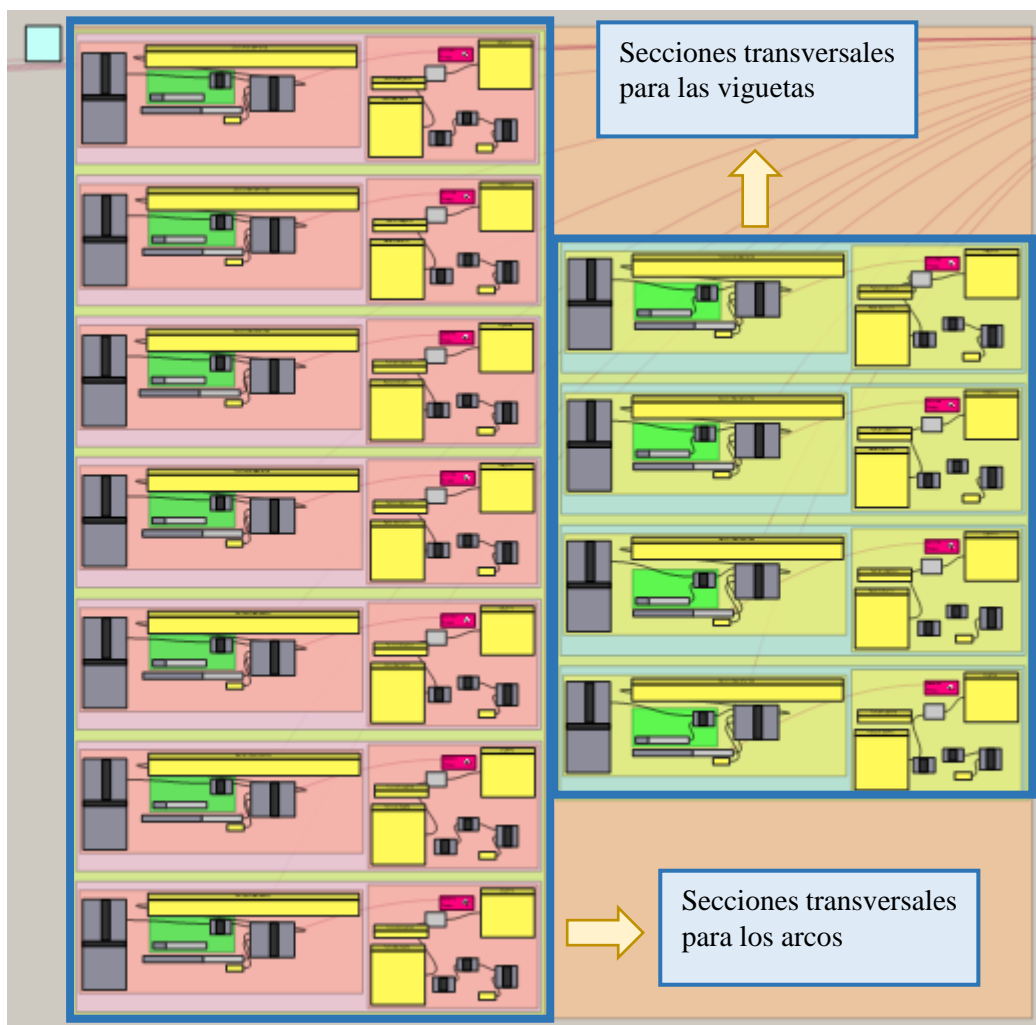


Figura 3.27. Secciones transversales de elementos que definen a la cobertura en el programa ejecutable o Guide.

E) Optimización de geometría, tamaño y cantidad.

Para iniciar con este proceso se da doble click izquierdo en el componente galápagos (ver *Figura 3.28*), aparecerá una ventana en la cual en la parte superior izquierda se dará doble click en la pestaña solvers (ver *Figura 3.29*). Para iniciar el proceso de optimización se da click el botón start solver y para terminar el proceso se da click el botón stop solver (ver *Figura 3.30*), cuando el número que está encerrado por el cuadro de color azul haya coincido o exista una pequeña diferencia con el resto de números (ver *Figura 3.31*).

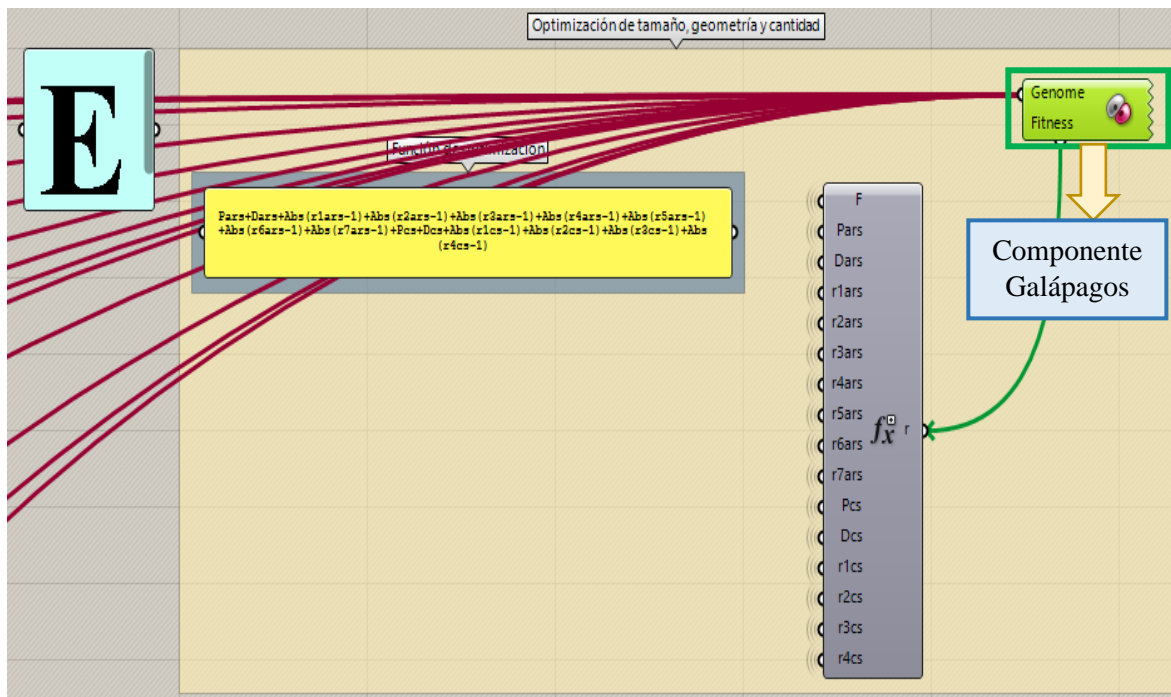


Figura 3.28. Código gráfico para la optimización de tamaño, geometría y cantidad en el programa ejecutable o Guide.

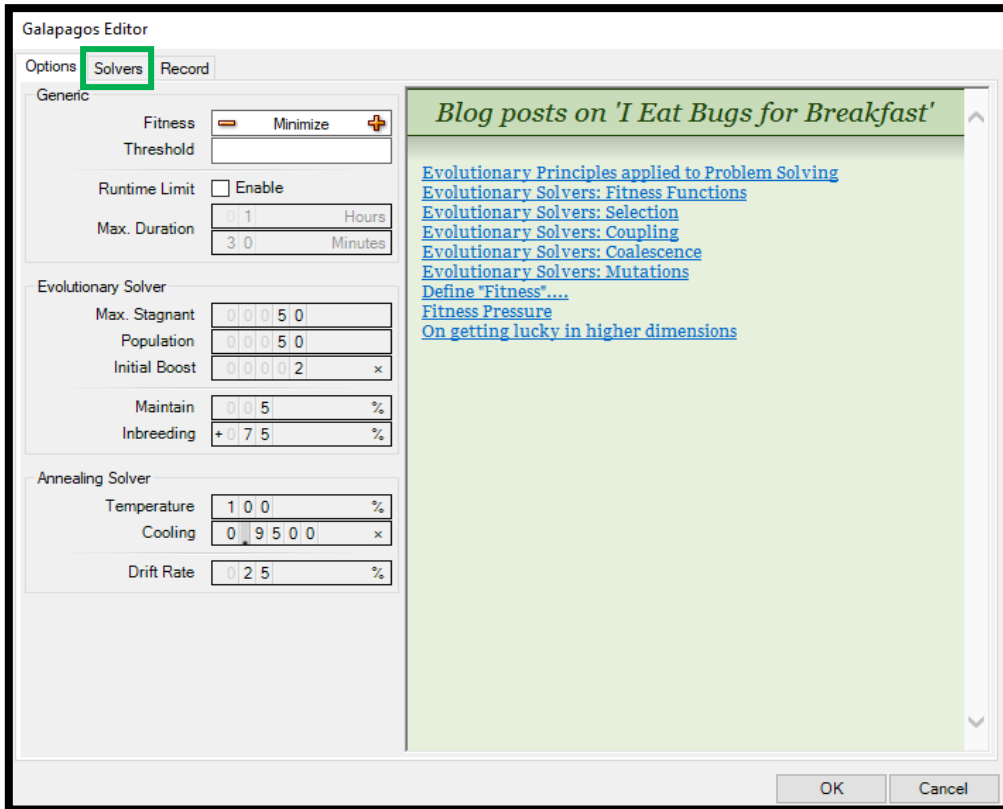


Figura 3.29. Primera ventana emergente del componente Galápagos.

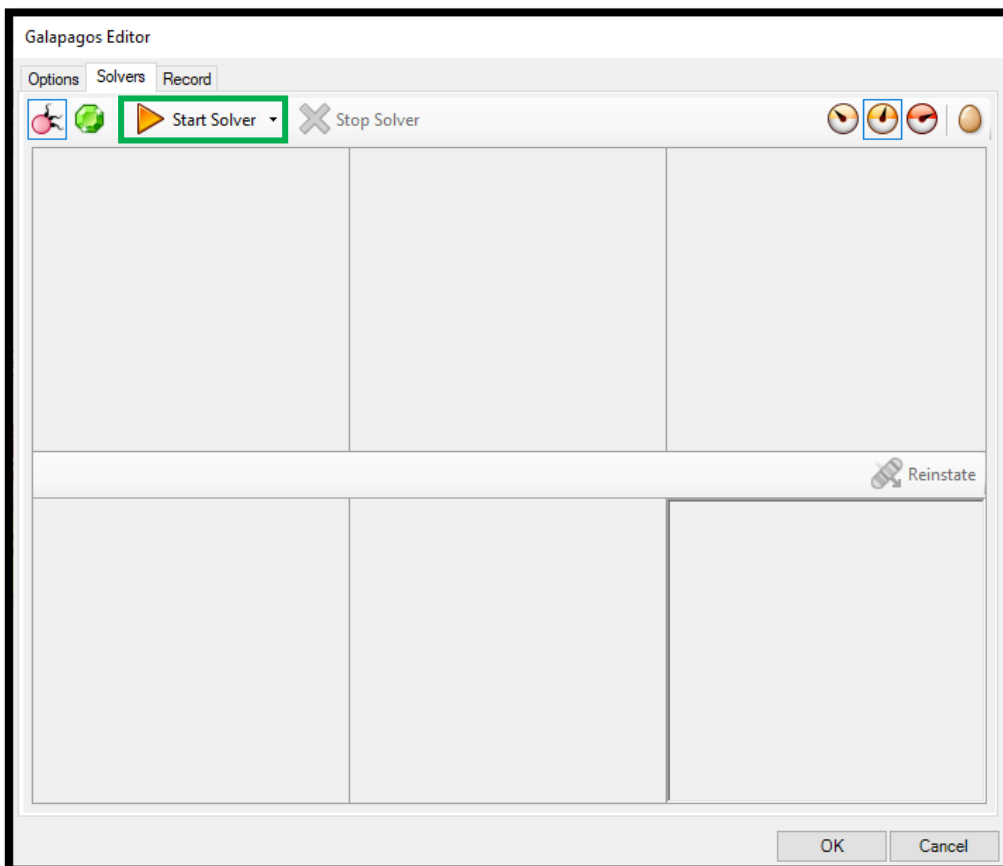


Figura 3.30. Segunda ventana emergente del componente Galápagos.

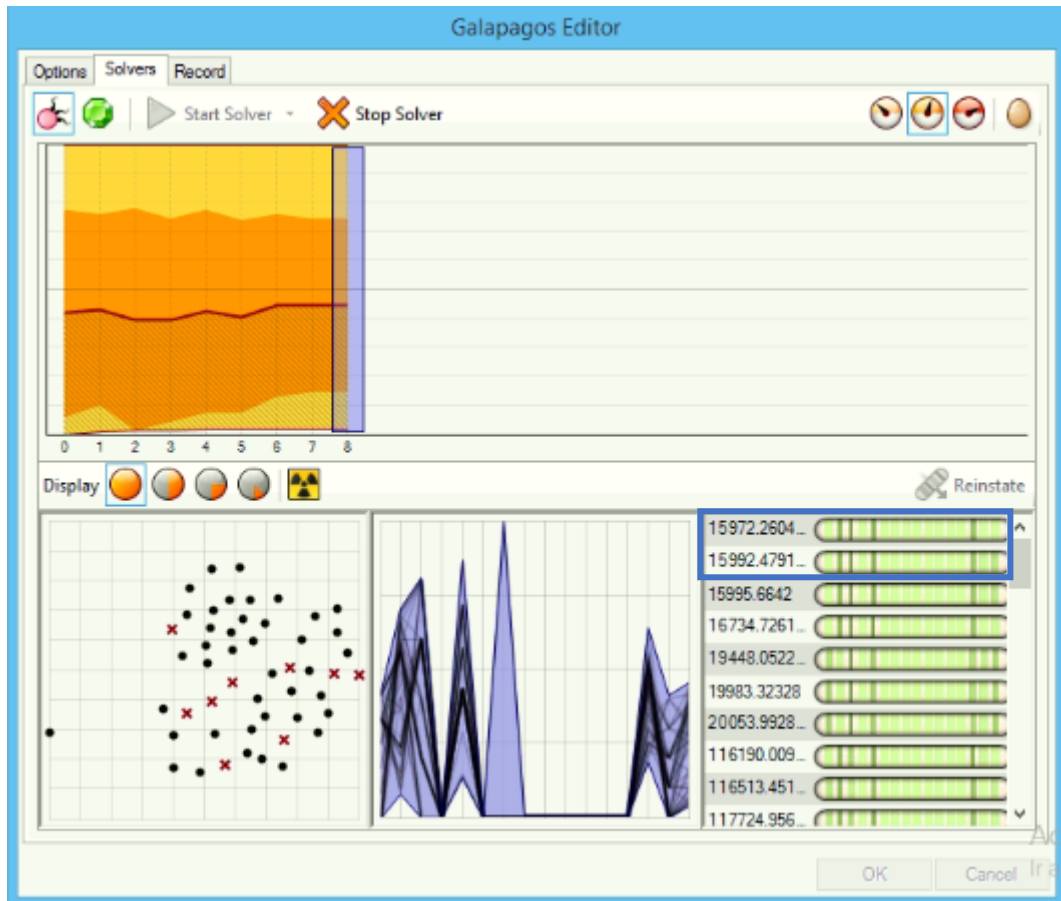


Figura 3.31. Proceso de optimización con el componente Galápagos.

F) Unir las salidas de los componentes líneas a las entradas de los componentes mover. Como ya se explicó líneas arriba, para poder optimizar se trabaja con dos arcos de celosía (ver Figura 3.32) pero para la visualización de toda la cobertura es necesario conectar la salida del componente “Ln” de cada uno de los elementos de los arcos a las entradas “G” de los componentes “Move” que aparecen al lado derecho (ver Figura 3.33).

Lo mismo se hace para poder visualizar el resto de viguetas, se une la salida “A” del componente “Short” con la entrada “A” del componente “Ln” y la salida “B” del componente “Short” con la entrada “B” del componente “Ln” (ver Figura 3.34).

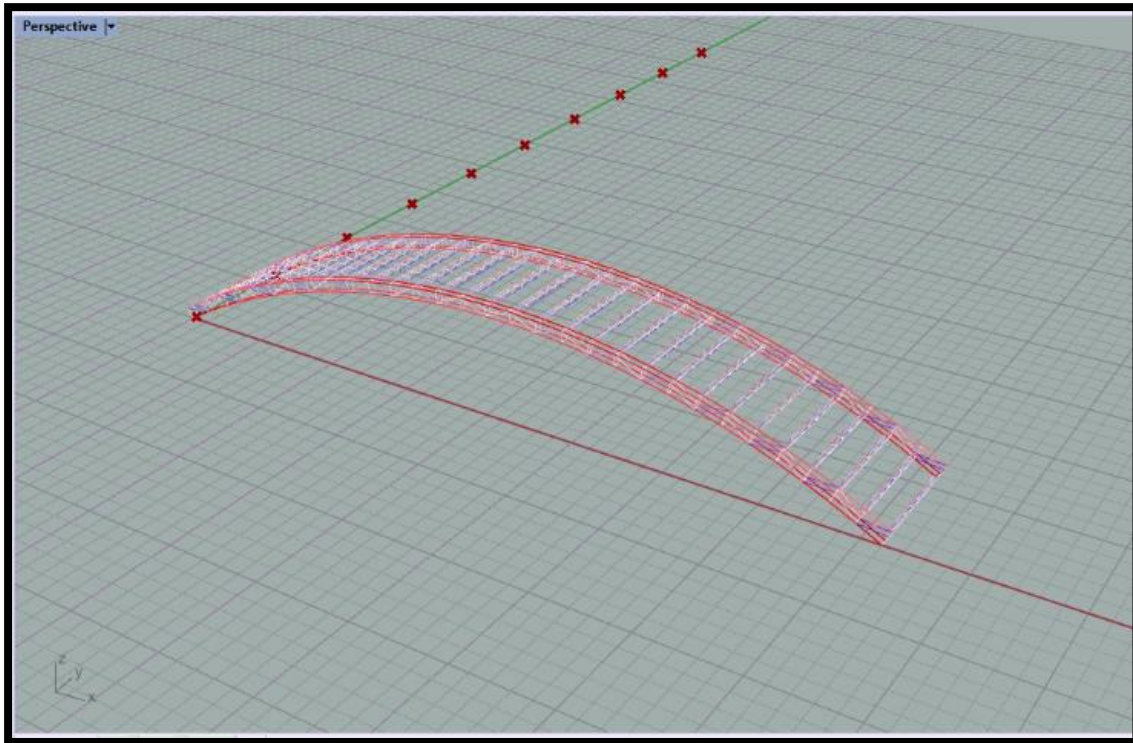


Figura 3.32. Visualización previa de los arcos de celosía para la optimización.

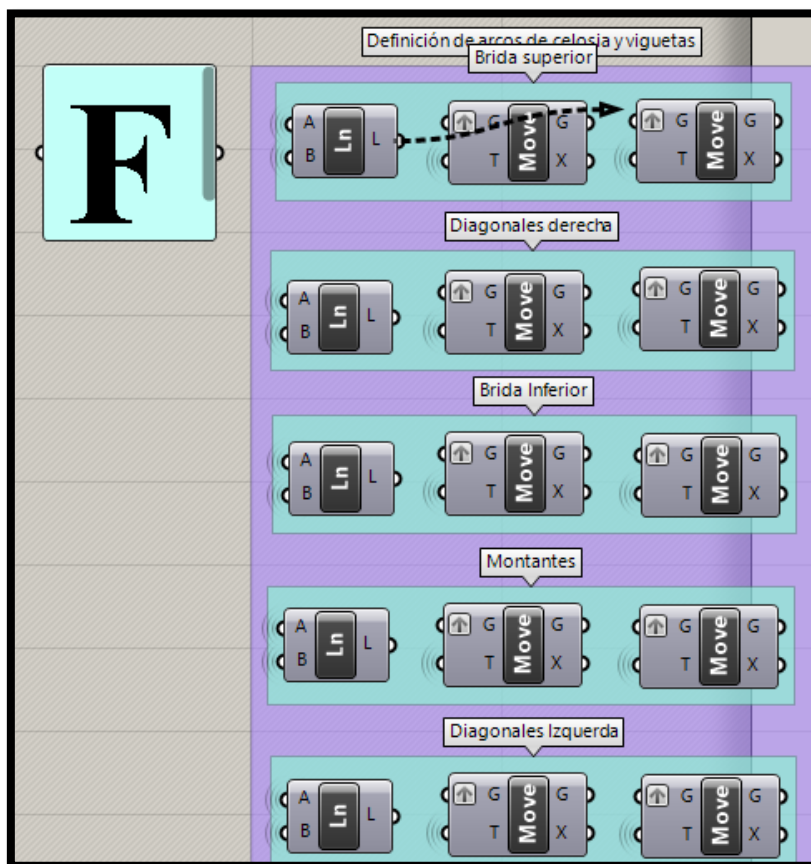


Figura 3.33. Código grafico en el guide para definir los arcos de celosía.

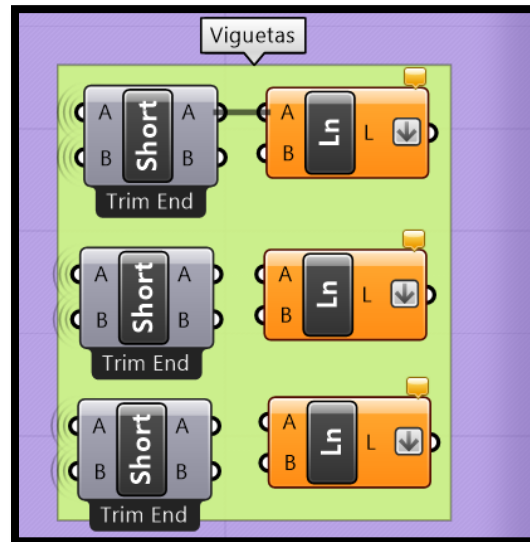


Figura 3.34. Código gráfico en el guide para definir a las viguetas.

Nota: el color naranja en el que aparece el componente Ln en la figura 3.34, se debe a que no se han establecido las conexiones, ello cambiará a color gris cuando se realice el proceso explicado líneas arriba.

G) Resultados 02: Deflexiones, fuerzas y ratios.

En esta sección se muestran los resultados del análisis estructural (deflexiones y fuerzas a tensión y compresión) y los ratios de diseño producto del diseño bajo la norma AISC 360-16.

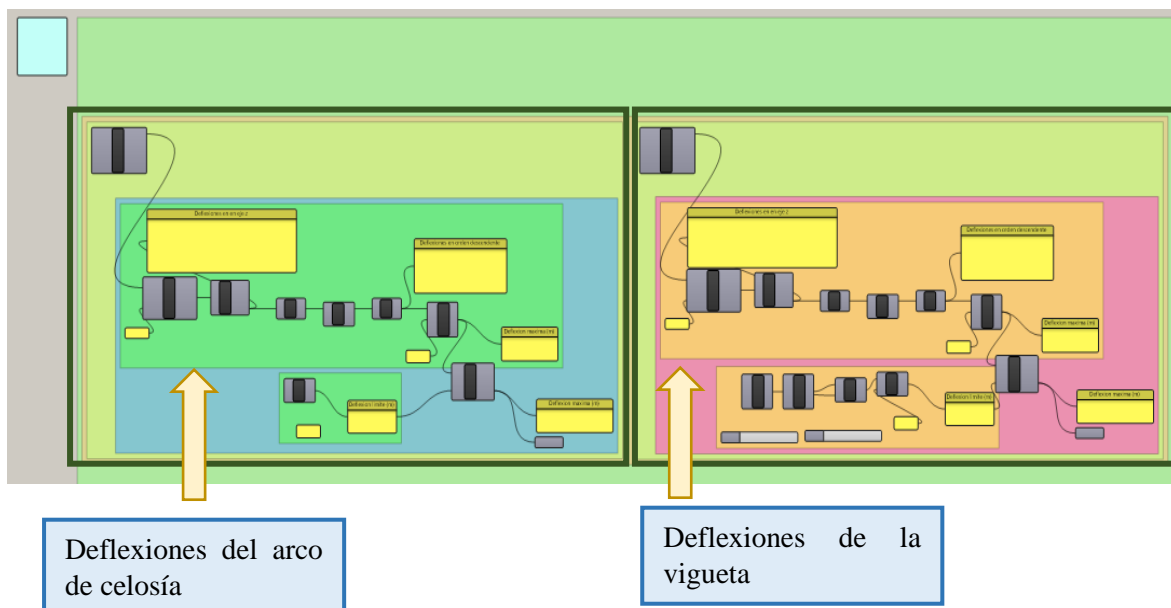


Figura 3.35. Visualización de los resultados de las deflexiones en arcos y viguetas.

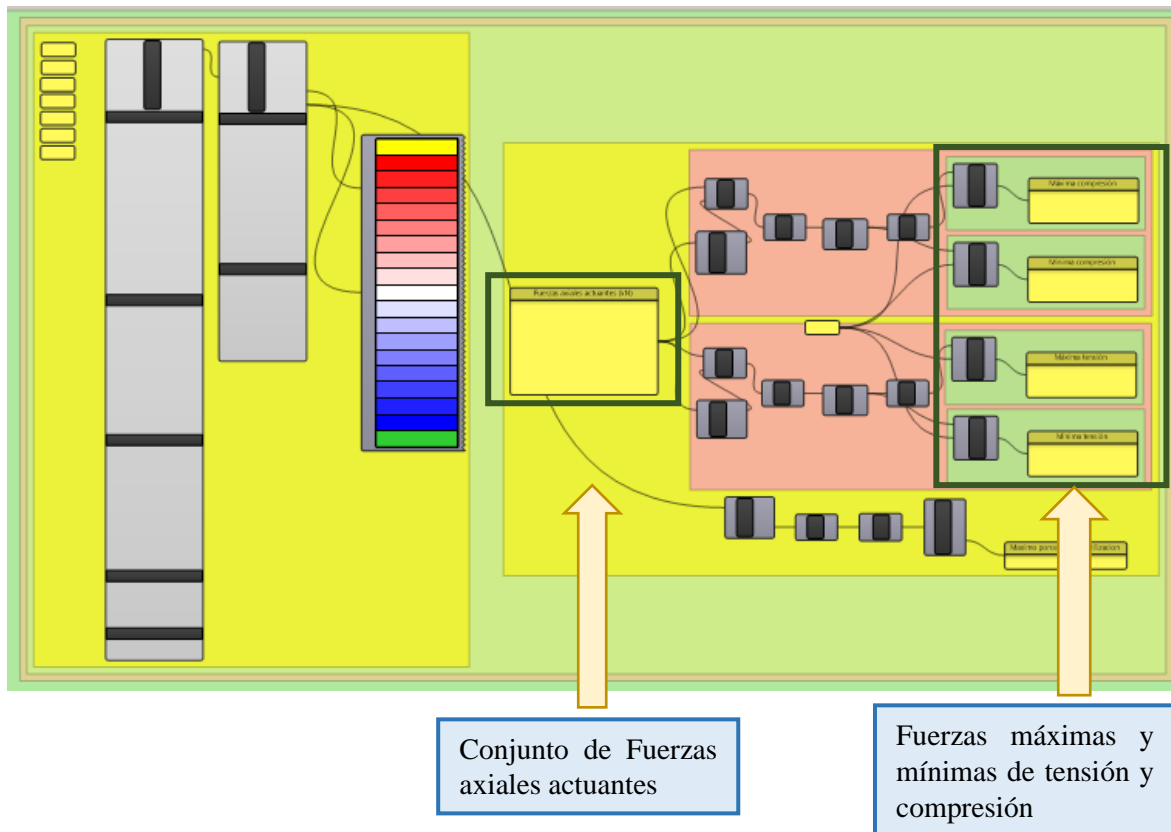


Figura 3.36. Visualización de los resultados de las fuerzas axiales actuantes.

Además, se pueden visualizar en el entorno de Rhinoceros 3D, los números de los elementos, numeración de los nodos, valor de cargas, área, material; haciendo click en el pequeño recuadro blanco que aparece al lado derecho de las opciones en el grupo “structure tags”. También se puede visualizar en el grupo “Display Scales”: la deformación, reacción, cargas, ejes locales pudiéndose controlar la escala o tamaño.

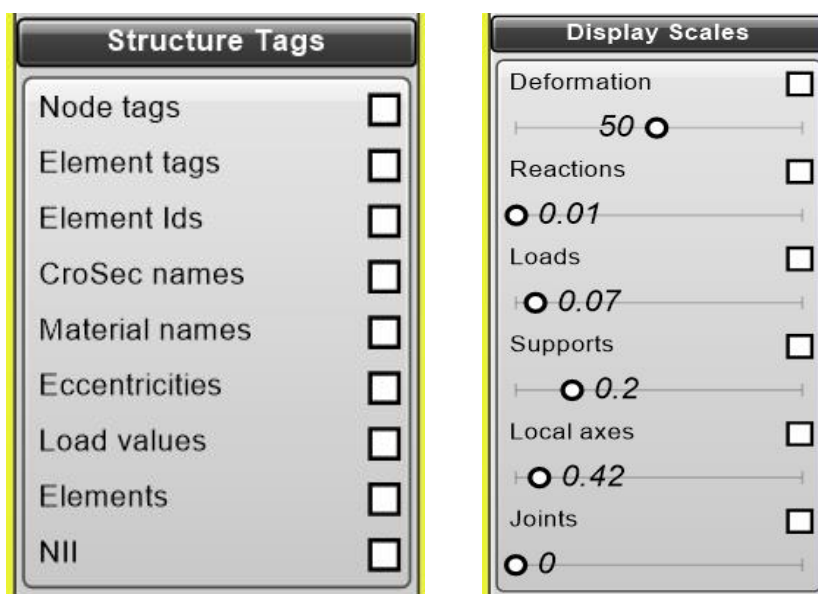


Figura 3.37. Componentes para la visualización de los resultados adicionales en el entorno de Rhinoceros 3D.

H) Resultados 03: Peso total

Como resultado final se obtiene el peso total de la estructura, visualizándose además el peso de las viguetas y de los arcos.

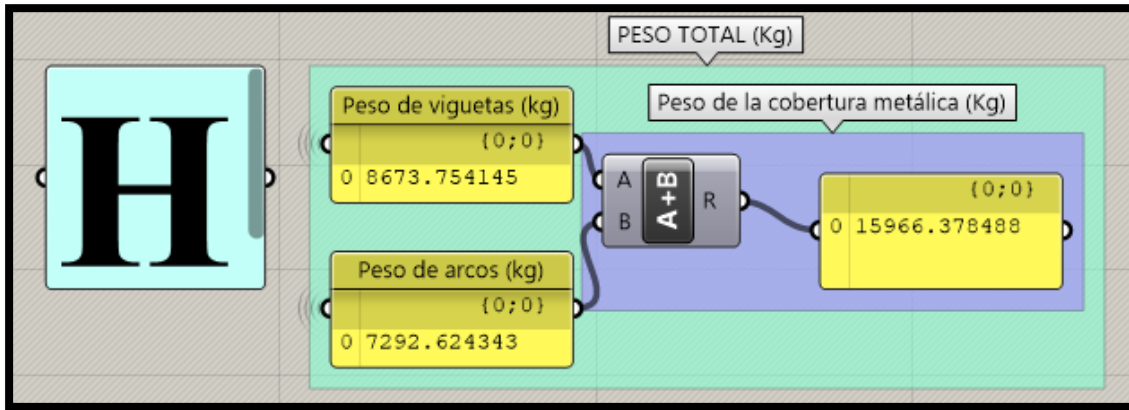


Figura 3.38. Visualización del peso total de la cobertura en el guide.

3.4.3. Ejemplo aplicativo:

Se requiere diseñar la cobertura metálica (arcos de celosía y viguetas 3D) optimizada (de menor peso) de cuatro modelos de campos deportivos ubicados en el departamento de Cajamarca; que satisfaga los requisitos de diseño.

Los terrenos destinados para la construcción de los campos deportivos tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 3.1: Dimensiones de los campos deportivos modelo.

Campo Deportivo N°	ANCHO (m)	LARGO (m)
1	41.00	53.00
2	35	52.70
3	38.15	46.32
4	44.36	56.50

Nota: La menor dimensión es la que representa a la Luz de diseño (L).

- **Arcos de viga de celosía**

A continuación, se presentan las características geométricas de dichos arcos:

Tabla 3.2: Características de los arcos de celosía que conforman las coberturas metálicas de los campos deportivos modelos.

CAMPO DEPORTIVO N°	Peralte (m)	Flecha (m)	Ancho (m)	N° de Segmentos	N° de Espacios
1	0.61	5.50	0.37	30	09
2	0.57	5.25	0.35	28	08
3	0.53	5.25	0.32	26	09
4	0.66	5.15	0.40	32	10

Nota: Para realizar el predimensionamiento del peralte (d) y ancho (b) se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

$$d = 1.5\% *L \quad b = 0.6*d$$

- La flecha está determinada de tal forma que la longitud de brida coincida con la longitud entre apoyos de la plancha a utilizar como cubierta. Por lo tanto, el número de segmentos de brida también depende de este criterio.
- El número de espacios más uno representa al número de arcos de celosía.

- **Viguetas tridimensionales**

Las viguetas 3D tienen las siguientes características geométricas:

Tabla 3.3: Características de las viguetas que conforman las coberturas metálicas de los campos deportivos modelos.

CAMPO DEPORTIVO N°	PERALTE (m)	ANCHO (m)	N° DE DIAGONALES
1	0.30	0.20	16
2	0.30	0.20	16
3	0.30	0.20	16
4	0.28	0.20	16

Nota: Para realizar el predimensionamiento del peralte (d) y ancho (b) se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

$$d = L/20 \quad b = 0.6*d$$

L= separación entre arcos o longitud de vigueta.

La separación entre viguetas está determinada por la longitud de apoyos de la plancha o panel.

Para complementar todo lo requerido para el diseño se tienen los siguientes datos:

- Se utilizará un panel traslucida 150 – onda 177, cuya carga es 1.50 Kg/m^2 y longitud entre apoyos es 1.45 m (ver catálogo de techos fibraforte – Anexo 03).
- Se supondrá una carga auxiliar de 10 kg/m^2 que corresponde a otro tipo de cargas como accesorios, luminarias, personal y equipo, etc.
- Carga viva en azoteas: 50 kg/m^2 para techos curvos (Norma E.020 – Cargas del Reglamento Nacional de Edificaciones).
- La velocidad de diseño hasta 10 m para el departamento de Cajamarca según el mapa eólico del Perú es de 75 km/h.
- Tensión última: $400 \text{ Mpa} = 58015 \text{ psi}$ y ERW como tipo de soldadura (ver catálogos de aceros Arequipa y Miromina – Anexos 03).
- La Norma E.020 del R.N.E. para arcos o cubiertas cilíndricas nos da los siguientes factores de forma: 0.8 para barlovento (presión) y - 0.5 para sotavento (succión). Se utilizará el factor de carga que dé una carga de viento mayor y eso se puede obtener con el mayor de ellos; es decir se empleará el factor de 0.8.
- Altura de columnas: 4.75 m para el campo deportivo N° 1, 4.70 m para el campo deportivo N° 2, 4.80 m para el campo deportivo N° 3 y 4.65 m para el campo deportivo N° 4.
- El tipo de acero a usar para cada uno de los elementos son los perfiles tubulares circulares HSRO (ASTM A500 grado B).

3.5. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados:

3.5.1. Tratamiento y análisis de datos:

En el tratamiento y análisis de datos del ejemplo aplicativo, se utilizó un análisis descriptivo. Los resultados obtenidos se mostrarán en tablas, figuras y porcentajes.

3.5.2. Presentación de resultados:

Una vez creado el guide siguiendo todo el proceso explicado en la sección 3.4.1., se procederá a ponerlo en funcionamiento con un ejemplo aplicativo, el cual contempla a 04 campos deportivos modelos, cuyas características de cada uno se encuentran detalladas líneas arriba.

Además, para validar los resultados obtenidos en el guide, se modelará un arco de celosía en el programa SAP 2000.

3.5.2.1. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 1:

Sección	Parámetro	Valor
Terreno	Ancho (m)	41.000
	Largo (m)	53.000
Viguetas	Peralte (m)	0.300
	Numero de diagonales	16
	Ancho (m)	0.200
Cargas	Carga de panel (Kg/m ²)	1.500
	Carga auxiliar (Kg/m ²)	10.000
	Carga viva (Kg/m ²)	0.000
	Carga viva en azoteas (Kg/m ²)	50.000
	Carga de nieve (Kg/m ²)	0
	Carga de sismo (Kg/m ²)	0
Cargas	Carga de lluvia o granizo (Kg/m ²)	0
	Parámetros de control	
Arcos de celosía	Flecha (m)	5.500
	Peralte (m)	0.610
	Numero de segmentos	30
	Numero de espacios	9
	Ancho (m)	0.370
Otros datos	Altura de columna (m)	4.750
	Factor de forma (C)	0.8
	V. de diseño hasta 10 m (Km/h)	75.000
	L. entre apoyos de calamina (m)	1.45
	Tipo de soldadura	ERR
	Fu - Tension Ultima (psi)	55015

Figura 3.39. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°01.

✓ Resultados para el Arco de celosía.

Como resultado de la introducción de los parámetros iniciales en el panel de control, obtenemos automáticamente el modelo paramétrico en el entorno de Rhinoceros 3D.

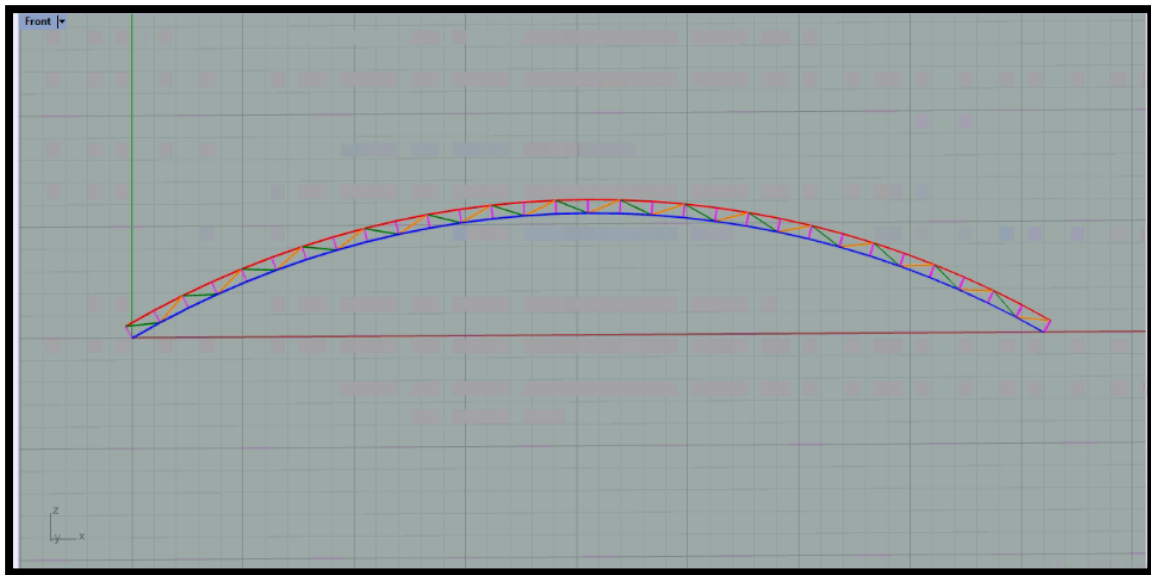


Figura 3.40. Arco de viga de celosía definido en modelación paramétrica del Campo deportivo N°01.

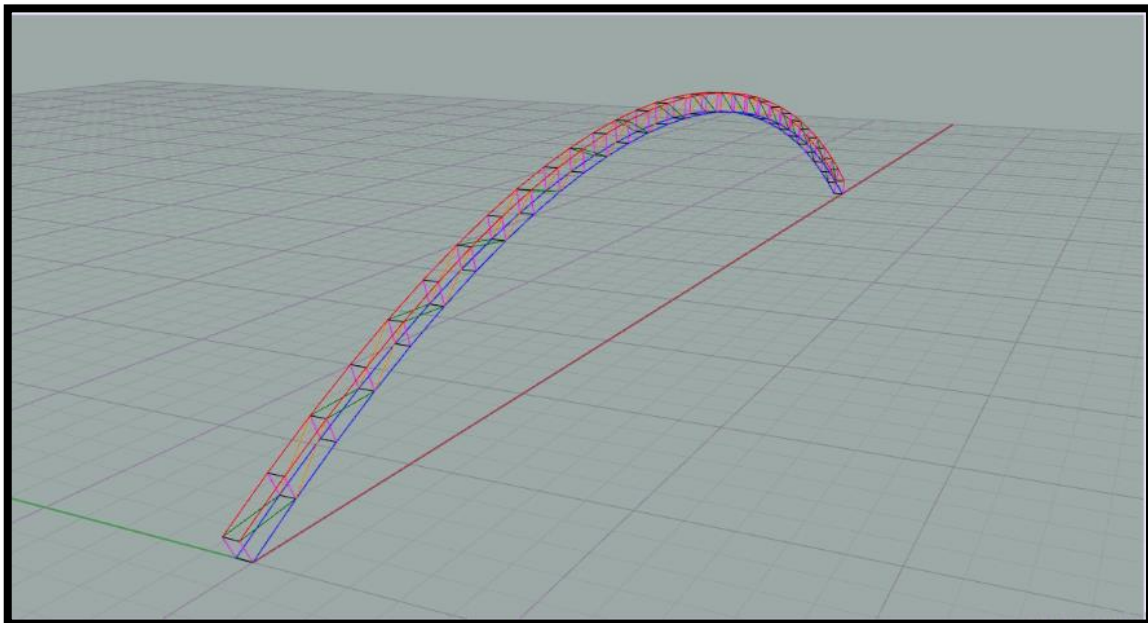


Figura 3.41. Visualización 3D del arco de viga de celosía definido en modelación paramétrica del Campo deportivo N°01.

Luego de realizar la optimización de tamaño, geometría y cantidad con el plugin Galápagos, obtenemos los siguientes resultados:



Figura 3.42. Características geométricas modificadas para los arcos de celosías después de la optimización-Campo deportivo N° 01.

Por cuestiones constructivas redondeamos a dos decimales el peralte y el ancho de los arcos de celosía.



Figura 3.43. Características geométricas de la solución óptima final para los arcos de celosía- Campo deportivo N°01.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el diseño de cada uno de los elementos de un arco de celosía tridimensional.

Tabla 3.4: Resultados de diseño de las bridas superiores obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	RESISTENCIA DE DISEÑO (lb)	FUERZAS INTERNAS (KN)	RATIOS	RESISTENCIA DE DISEÑO (lb)	FUERZAS INTERNAS (KN)	RATIOS
BRIDAS SUPERIORES	1	14332.1768	-30.6258	0.4804	14373.8514	-40.9076	0.6398
	2	14332.1768	-30.6258	0.4804	14373.8514	-40.9076	0.6398
	3	14332.1763	-30.6258	0.4804	14373.8509	-40.9076	0.6398
	4	14332.1763	-30.6258	0.4804	14373.8509	-40.9076	0.6398
	5	14332.1766	-38.1159	0.5979	14373.8512	-46.3069	0.7242
	6	14332.1766	-38.1159	0.5979	14373.8512	-46.3069	0.7242
	7	14332.1770	-38.1159	0.5979	14373.8516	-46.3069	0.7242
	8	14332.1770	-38.1159	0.5979	14373.8516	-46.3069	0.7242
	9	14332.1775	-44.5166	0.6983	14373.8521	-50.9209	0.7964
	10	14332.1775	-44.5166	0.6983	14373.8521	-50.9209	0.7964
	11	14332.1751	-44.5166	0.6983	14373.8497	-50.9209	0.7964
	12	14332.1751	-44.5166	0.6983	14373.8497	-50.9209	0.7964
	13	14332.1773	-49.7967	0.7811	14373.8519	-54.7271	0.8559
	14	14332.1773	-49.7967	0.7811	14373.8519	-54.7271	0.8559
	15	14332.1766	-49.7967	0.7811	14373.8512	-54.7271	0.8559
	16	14332.1766	-49.7967	0.7811	14373.8512	-54.7271	0.8559
	17	14332.1756	-53.9304	0.8459	14373.8502	-57.7070	0.9025
	18	14332.1756	-53.9304	0.8459	14373.8502	-57.7070	0.9025
	19	14332.1770	-53.9304	0.8459	14373.8516	-57.7070	0.9025

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS SUPERIORES	18	14332.1756	-53.9304	0.8459	14373.8502	-57.7070	0.9025
	19	14332.1770	-53.9304	0.8459	14373.8516	-57.7070	0.9025
	20	14332.1770	-53.9304	0.8459	14373.8516	-57.7070	0.9025
	21	14332.1766	-56.8976	0.8925	14373.8512	-59.8459	0.9360
	22	14332.1766	-56.8976	0.8925	14373.8512	-59.8459	0.9360
	23	14332.1765	-56.8976	0.8925	14373.8511	-59.8459	0.9360
	24	14332.1765	-56.8976	0.8925	14373.8511	-59.8459	0.9360
	25	14332.1765	-58.6837	0.9205	14373.8511	-61.1334	0.9561
	26	14332.1765	-58.6837	0.9205	14373.8511	-61.1334	0.9561
	27	14332.1758	-58.6837	0.9205	14373.8504	-61.1334	0.9561
	28	14332.1758	-58.6837	0.9205	14373.8504	-61.1334	0.9561
	29	14332.1767	-59.2801	0.9298	14373.8513	-61.5633	0.9629
	30	14332.1767	-59.2801	0.9298	14373.8513	-61.5633	0.9629
	31	14332.1760	-59.2801	0.9298	14373.8506	-61.5633	0.9629
	32	14332.1760	-59.2801	0.9298	14373.8506	-61.5633	0.9629
	33	14332.1761	-58.6837	0.9205	14373.8507	-61.1334	0.9561
	34	14332.1761	-58.6837	0.9205	14373.8507	-61.1334	0.9561
	35	14332.1775	-58.6837	0.9205	14373.8521	-61.1334	0.9561
	36	14332.1775	-58.6837	0.9205	14373.8521	-61.1334	0.9561
	37	14332.1765	-56.8976	0.8925	14373.8511	-59.8459	0.9360

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	Nº DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS SUPERIORES	38	14332.1765	-56.8976	0.8925	14373.8511	-59.8459	0.9360
	39	14332.1765	-56.8976	0.8925	14373.8511	-59.8459	0.9360
	40	14332.1765	-56.8976	0.8925	14373.8511	-59.8459	0.9360
	41	14332.1765	-53.9304	0.8459	14373.8511	-57.7070	0.9025
	42	14332.1765	-53.9304	0.8459	14373.8511	-57.7070	0.9025
	43	14332.1766	-53.9304	0.8459	14373.8512	-57.7070	0.9025
	44	14332.1766	-53.9304	0.8459	14373.8512	-57.7070	0.9025
	45	14332.1764	-49.7967	0.7811	14373.8510	-54.7271	0.8559
	46	14332.1764	-49.7967	0.7811	14373.8510	-54.7271	0.8559
	47	14332.1764	-49.7967	0.7811	14373.8510	-54.7271	0.8559
	48	14332.1764	-49.7967	0.7811	14373.8510	-54.7271	0.8559
	49	14332.1764	-44.5166	0.6983	14373.8510	-50.9209	0.7964
	50	14332.1764	-44.5166	0.6983	14373.8510	-50.9209	0.7964
	51	14332.1765	-44.5166	0.6983	14373.8511	-50.9209	0.7964
	52	14332.1765	-44.5166	0.6983	14373.8511	-50.9209	0.7964
	53	14332.1768	-38.1159	0.5979	14373.8514	-46.3069	0.7242
	54	14332.1768	-38.1159	0.5979	14373.8514	-46.3069	0.7242
	55	14332.1762	-38.1159	0.5979	14373.8508	-46.3069	0.7242
	56	14332.1762	-38.1159	0.5979	14373.8508	-46.3069	0.7242
	57	14332.1763	-30.6258	0.4804	14373.8509	-40.9076	0.6398
58	14332.1763	-30.6258	0.4804	14373.8509	-40.9076	0.6398	
59	14332.1775	-30.6258	0.4804	14373.8521	-40.9076	0.6398	
60	14332.1775	-30.6258	0.4804	14373.8521	-40.9076	0.6398	

Tabla 3.5: Resultados de diseño de las diagonales derecha obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES DERECHA	1	2007.5485	-4.2431	0.4752	1709.1338	-2.9221	0.3844
	2	2007.5485	-4.2431	0.4752	1709.1338	-2.9221	0.3844
	3	2007.5487	-3.6520	0.4090	1709.1340	-2.5150	0.3308
	4	2007.5487	-3.6520	0.4090	1709.1340	-2.5150	0.3308
	5	2007.5480	-3.0430	0.3408	1709.1333	-2.0956	0.2756
	6	2007.5480	-3.0430	0.3408	1709.1333	-2.0956	0.2756
	7	2007.5486	-2.4191	0.2709	1709.1339	-1.6660	0.2191
	8	2007.5486	-2.4191	0.2709	1709.1339	-1.6660	0.2191
	9	2007.5487	-1.7835	0.1997	1709.1340	-1.2282	0.1616
	10	2007.5487	-1.7835	0.1997	1709.1340	-1.2282	0.1616
	11	2007.5486	-1.1391	0.1276	1709.1339	-0.7845	0.1032
	12	2007.5486	-1.1391	0.1276	1709.1339	-0.7845	0.1032
	13	2007.5482	-0.4892	0.0548	1709.1336	-0.3369	0.0443
	14	2007.5482	-0.4892	0.0548	1709.1336	-0.3369	0.0443
	15	11132.3109	0.1631	0.0033	8261.3465	0.1123	0.0031
	16	11132.3109	0.1631	0.0033	8261.3465	0.1123	0.0031
	17	11132.3109	0.8147	0.0165	8261.3465	0.5610	0.0153
	18	11132.3109	0.8147	0.0165	8261.3465	0.5610	0.0153
	19	11132.3109	1.4622	0.0295	8261.3465	1.0070	0.0274

DIAGONALES DERECHA	20	11132.3109	1.4622	0.0295	8261.3465	1.0070	0.0274
	21	11132.3109	2.1026	0.0425	8261.3465	1.4480	0.0394
	22	11132.3109	2.1026	0.0425	8261.3465	1.4480	0.0394
	23	11132.3109	2.7327	0.0552	8261.3465	1.8820	0.0512
	24	11132.3109	2.7327	0.0552	8261.3465	1.8820	0.0512
	25	11132.3109	3.3495	0.0676	8261.3465	2.3067	0.0628
	26	11132.3109	3.3495	0.0676	8261.3465	2.3067	0.0628
	27	11132.3109	3.9500	0.0798	8261.3465	2.7202	0.0740
	28	11132.3109	3.9500	0.0798	8261.3465	2.7202	0.0740
	29	11132.3109	4.5311	0.0915	8261.3465	3.1204	0.0849
	30	11132.3109	4.5311	0.0915	8261.3465	3.1204	0.0849

Tabla 3.6: Resultados de diseño de las bridas inferiores obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	1	27678.5986	-117.3363	0.9530	27678.5986	-121.1921	0.9843
	2	27678.5986	-117.3363	0.9530	27678.5986	-121.1921	0.9843
	3	27678.5976	-109.1955	0.8869	27678.5976	-115.3520	0.9369
	4	27678.5976	-109.1955	0.8869	27678.5976	-115.3520	0.9369
	5	27678.5981	-109.1955	0.8869	27678.5981	-115.3520	0.9369

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	6	27678.5981	-109.1955	0.8869	27678.5981	-115.3520	0.9369
	7	27678.5989	-102.1424	0.8296	27678.5989	-110.2921	0.8958
	8	27678.5989	-102.1424	0.8296	27678.5989	-110.2921	0.8958
	9	27678.6000	-102.1424	0.8296	27678.6000	-110.2921	0.8958
	10	27678.6000	-102.1424	0.8296	27678.6000	-110.2921	0.8958
	11	27678.5952	-96.2114	0.7814	27678.5952	-106.0373	0.8612
	12	27678.5952	-96.2114	0.7814	27678.5952	-106.0373	0.8612
	13	27678.5996	-96.2114	0.7814	27678.5996	-106.0373	0.8612
	14	27678.5996	-96.2114	0.7814	27678.5996	-106.0373	0.8612
	15	27678.5982	-91.4314	0.7426	27678.5982	-102.6082	0.8334
	16	27678.5982	-91.4314	0.7426	27678.5982	-102.6082	0.8334
	17	27678.5962	-91.4314	0.7426	27678.5962	-102.6082	0.8334
	18	27678.5962	-91.4314	0.7426	27678.5962	-102.6082	0.8334
	19	27678.5990	-87.8259	0.7133	27678.5990	-100.0216	0.8124
	20	27678.5990	-87.8259	0.7133	27678.5990	-100.0216	0.8124
	21	27678.5982	-87.8259	0.7133	27678.5982	-100.0216	0.8124
	22	27678.5982	-87.8259	0.7133	27678.5982	-100.0216	0.8124
	23	27678.5981	-85.4123	0.6937	27678.5981	-98.2901	0.7983
	24	27678.5981	-85.4123	0.6937	27678.5981	-98.2901	0.7983

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	25	27678.5981	-85.4123	0.6937	27678.5981	-98.2901	0.7983
	26	27678.5981	-85.4123	0.6937	27678.5981	-98.2901	0.7983
	27	27678.5965	-84.2026	0.6839	27678.5965	-97.4223	0.7913
	28	27678.5965	-84.2026	0.6839	27678.5965	-97.4223	0.7913
	29	27678.5983	-84.2026	0.6839	27678.5983	-97.4223	0.7913
	30	27678.5983	-84.2026	0.6839	27678.5983	-97.4223	0.7913
	31	27678.5969	-84.2026	0.6839	27678.5969	-97.4223	0.7913
	32	27678.5969	-84.2026	0.6839	27678.5969	-97.4223	0.7913
	33	27678.5972	-84.2026	0.6839	27678.5972	-97.4223	0.7913
	34	27678.5972	-84.2026	0.6839	27678.5972	-97.4223	0.7913
	35	27678.6001	-85.4123	0.6937	27678.6001	-98.2901	0.7983
	36	27678.6001	-85.4123	0.6937	27678.6001	-98.2901	0.7983
	37	27678.5980	-85.4123	0.6937	27678.5980	-98.2901	0.7983
	38	27678.5980	-85.4123	0.6937	27678.5980	-98.2901	0.7983
	39	27678.5980	-87.8259	0.7133	27678.5980	-100.0216	0.8124
	40	27678.5980	-87.8259	0.7133	27678.5980	-100.0216	0.8124
	41	27678.5980	-87.8259	0.7133	27678.5980	-100.0216	0.8124
	42	27678.5980	-87.8259	0.7133	27678.5980	-100.0216	0.8124
	43	27678.5982	-91.4314	0.7426	27678.5982	-102.6082	0.8334

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	44	27678.5982	-91.4314	0.7426	27678.5982	-102.6082	0.8334
	45	27678.5978	-91.4314	0.7426	27678.5978	-102.6082	0.8334
	46	27678.5978	-91.4314	0.7426	27678.5978	-102.6082	0.8334
	47	27678.5978	-96.2114	0.7814	27678.5978	-106.0373	0.8612
	48	27678.5978	-96.2114	0.7814	27678.5978	-106.0373	0.8612
	49	27678.5979	-96.2114	0.7814	27678.5979	-106.0373	0.8612
	50	27678.5979	-96.2114	0.7814	27678.5979	-106.0373	0.8612
	51	27678.5980	-102.1424	0.8296	27678.5980	-110.2921	0.8958
	52	27678.5980	-102.1424	0.8296	27678.5980	-110.2921	0.8958
	53	27678.5985	-102.1424	0.8296	27678.5985	-110.2921	0.8958
	54	27678.5985	-102.1424	0.8296	27678.5985	-110.2921	0.8958
	55	27678.5973	-109.1955	0.8869	27678.5973	-115.3520	0.9369
	56	27678.5973	-109.1955	0.8869	27678.5973	-115.3520	0.9369
	57	27678.5976	-109.1955	0.8869	27678.5976	-115.3520	0.9369
	58	27678.5976	-109.1955	0.8869	27678.5976	-115.3520	0.9369
	59	27678.5999	-117.3363	0.9530	27678.5999	-121.1921	0.9843
	60	27678.5999	-117.3363	0.9530	27678.5999	-121.1921	0.9843

Tabla 3.7: Resultados de diseño de las diagonales izquierda obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES IZQUIERDA	1	11132.3109	4.5311	0.0915	8261.3465	3.1204	0.0849
	2	11132.3109	4.5311	0.0915	8261.3465	3.1204	0.0849
	3	11132.3109	3.9500	0.0798	8261.3465	2.7202	0.0740
	4	11132.3109	3.9500	0.0798	8261.3465	2.7202	0.0740
	5	11132.3109	3.3495	0.0676	8261.3465	2.3067	0.0628
	6	11132.3109	3.3495	0.0676	8261.3465	2.3067	0.0628
	7	11132.3109	2.7327	0.0552	8261.3465	1.8820	0.0512
	8	11132.3109	2.7327	0.0552	8261.3465	1.8820	0.0512
	9	11132.3109	2.1026	0.0425	8261.3465	1.4480	0.0394
	10	11132.3109	2.1026	0.0425	8261.3465	1.4480	0.0394
	11	11132.3109	1.4622	0.0295	8261.3465	1.0070	0.0274
	12	11132.3109	1.4622	0.0295	8261.3465	1.0070	0.0274
	13	11132.3109	0.8147	0.0165	8261.3465	0.5610	0.0153
	14	11132.3109	0.8147	0.0165	8261.3465	0.5610	0.0153
	15	11132.3109	0.1631	0.0033	8261.3465	0.1123	0.0031
	16	11132.3109	0.1631	0.0033	8261.3465	0.1123	0.0031
	17	2007.5484	-0.4892	0.0548	1709.1337	-0.3369	0.0443
	18	2007.5484	-0.4892	0.0548	1709.1337	-0.3369	0.0443
	19	2007.5486	-1.1391	0.1276	1709.1339	-0.7845	0.1032

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES IZQUIERDA	20	2007.5486	-1.1391	0.1276	1709.1339	-0.7845	0.1032
	21	2007.5486	-1.7835	0.1997	1709.1339	-1.2282	0.1616
	22	2007.5486	-1.7835	0.1997	1709.1339	-1.2282	0.1616
	23	2007.5485	-2.4191	0.2709	1709.1338	-1.6660	0.2191
	24	2007.5485	-2.4191	0.2709	1709.1338	-1.6660	0.2191
	25	2007.5485	-3.0430	0.3408	1709.1338	-2.0956	0.2756
	26	2007.5485	-3.0430	0.3408	1709.1338	-2.0956	0.2756
	27	2007.5486	-3.6520	0.4090	1709.1340	-2.5150	0.3308
	28	2007.5486	-3.6520	0.4090	1709.1340	-2.5150	0.3308
	29	2007.5485	-4.2431	0.4752	1709.1338	-2.9221	0.3844
	30	2007.5485	-4.2431	0.4752	1709.1338	-2.9221	0.3844

Tabla 3.8: Resultados de diseño de los enlaces obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
ENLACES	1	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	2	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	3	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	4	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	5	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	6	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	7	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	8	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	9	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	10	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	11	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	12	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	13	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	14	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	15	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	16	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	17	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	18	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	19	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000

		ARCO DE CELOSIA					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
ENLACES	20	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	21	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	22	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	23	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	24	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	25	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	26	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	27	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	28	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	29	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	30	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000
	31	7411.3358	0.0000	0.0000	7577.7612	0.0000	0.0000

Tabla 3.9: Secciones transversales obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización – Campo deportivo N°01.

ELEMENTOS	SECCIONES TRANSVERSALES - HSRO (mm)	
	ARCOS DE CELOSIA	
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION
Brida superior	60.3x1.8	60.3x1.8
Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x2.5
Brida inferior	60.3x3.9	60.3x3.9
Montante	26.7x2.5	26.7x1.8
Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8
Enlaces	26.7x1.8	26.7x1.8

✓ **Resultados para las viguetas tridimensionales.**

Como resultado de la introducción de los parámetros iniciales en el panel de control, obtenemos automáticamente el modelo paramétrico en el entorno de Rhinoceros 3D.

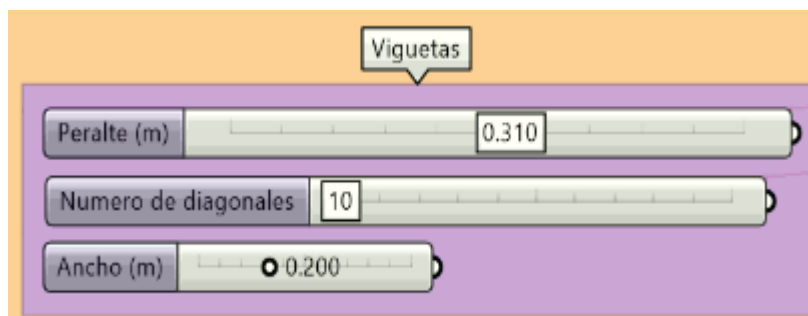


Figura 3.44. Características geométricas de la solución óptima final para las viguetas en 3D- Campo deportivo N°01.

Tabla 3.10: Resultados de diseño de las bridas superiores de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

		VIGUETA 3D					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS SUPERIORES	1	11132.31086	10.6177	0.2144	8261.3465	8.6423	0.2352
	2	11132.31086	0.9019	0.0182	2444.1236	-4.4483	0.4091
	3	7542.168877	-4.5034	0.1342	2444.1236	-8.3882	0.7715
	4	7542.168877	-7.0161	0.2091	2444.1236	-4.4483	0.4091
	5	7542.168877	-7.0161	0.2091	8261.3465	8.6423	0.2352
	6	7542.168877	-4.5034	0.1342	2444.1236	-0.1872	0.0172
	7	11132.31086	0.9019	0.0182	8261.3465	0.2768	0.0075
	8	11132.31086	10.6177	0.2144	2444.1236	-0.1792	0.0165
	9	7542.168877	0.7056	0.0142	8261.3465	0.2768	0.0075
	10	7542.168877	3.1342	0.0633	2444.1236	-0.1872	0.0172
	11	7542.168877	2.6774	0.0541			
	12	11132.31086	0.7061	0.0143			
	13	11132.31086	-1.1711	0.0349			
	14	11132.31086	-2.2124	0.0659			
	15	11132.31086	-2.2124	0.0659			
	16	7542.168877	-1.1711	0.0349			

Tabla 3.11: Resultados de diseño de las diagonales derecha de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

		VIGUETAS 3D					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES DERECHA	1	9286.880953	-8.389049	0.203075	5564.451595	-8.18076	0.33051
	2	9286.880953	-2.182268	0.052827	5564.451595	-1.993256	0.080529
	3	9286.880953	-0.614333	0.014871	5564.451595	-1.47403	0.059552
	4	9286.880953	-0.458707	0.011104	5564.451595	-1.988747	0.080347
	5	9286.880953	-0.681266	0.016492	5564.451595	-1.469521	0.05937
	6	9286.880953	-0.903824	0.021879	8261.346482	15.250053	0.414987
	7	9286.880953	-0.748199	0.018112	8261.346482	6.173436	0.167992
	8	11132.31086	0.819737	0.016554	8261.346482	1.020296	0.027764
	9	11132.31086	12.222294	0.24682	5574.022162	-3.417167	0.13782
	10	11132.31086	6.132652	0.123844	5574.022162	-8.570307	0.345654
	11	11132.31086	3.205728	0.064737			
	12	11132.31086	1.241703	0.025075			
	13	9303.066157	-0.46448	0.011224			
	14	9303.066157	-2.170663	0.052454			
	15	9303.066157	-4.134688	0.099915			
	16	9303.066157	-7.061612	0.170644			

Tabla 3.12: Resultados de diseño de las diagonales izquierda de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

		VIGUETAS 3D					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES IZQUIERDA	1	9286.880953	-8.389049	0.203075	5564.451595	-8.18076	0.33051
	2	9286.880953	-2.182268	0.052827	5564.451595	-1.993256	0.080529
	3	9286.880953	-0.614333	0.014871	5564.451595	-1.47403	0.059552
	4	9286.880953	-0.458707	0.011104	5564.451595	-1.988747	0.080347
	5	9286.880953	-0.681266	0.016492	5564.451595	-1.469521	0.05937
	6	9286.880953	-0.903824	0.021879	8261.346482	15.250053	0.414987
	7	9286.880953	-0.748199	0.018112	8261.346482	6.173436	0.167992
	8	11132.31086	0.819737	0.016554	8261.346482	1.020296	0.027764
	9	11132.31086	12.222294	0.24682	5574.022162	-3.417167	0.13782
	10	11132.31086	6.132652	0.123844	5574.022162	-8.570307	0.345654
	11	11132.31086	3.205728	0.064737			
	12	11132.31086	1.241703	0.025075			
	13	9303.066157	-0.46448	0.011224			
	14	9303.066157	-2.170663	0.052454			
	15	9303.066157	-4.134688	0.099915			
	16	9303.066157	-7.061612	0.170644			

Tabla 3.13: Resultados de diseño de las bridas inferiores de las viguetas obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

		VIGUETAS 3D					
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION			COBERTURA CON OPTIMIZACION		
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS RESISTENTES (lb)	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	1	11132.31086	7.880695	0.159145	8261.3465	15.618779	0.42502
	2	11132.31086	14.475812	0.292329	8261.3465	24.155953	0.657335
	3	11132.31086	18.649087	0.376605	8261.3465	24.155953	0.657335
	4	11132.31086	20.063965	0.405177	8261.3465	15.618779	0.42502
	5	11132.31086	18.649087	0.376605			
	6	11132.31086	14.475812	0.292329			
	7	11132.31086	7.880695	0.159145			

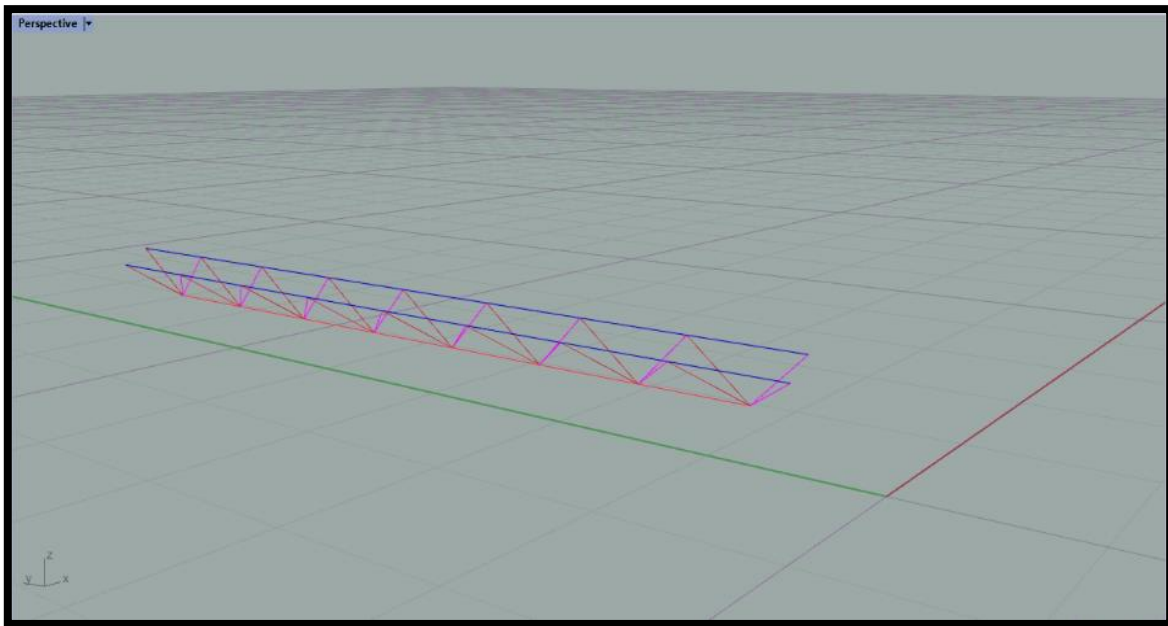


Figura 3.45. Vigueta tridimensional definido en modelación paramétrica sin optimización del campo deportivo N°01-16 diagonales.

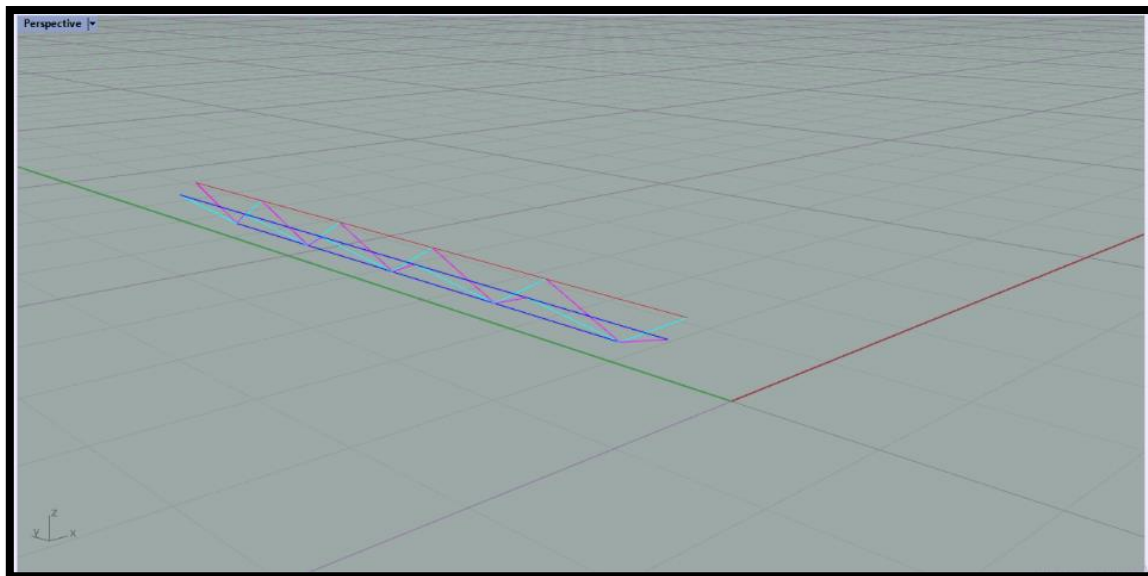


Figura 3.46. Vigueta tridimensional definido en modelación paramétrica después de la optimización del campo deportivo N°01-10 diagonales.

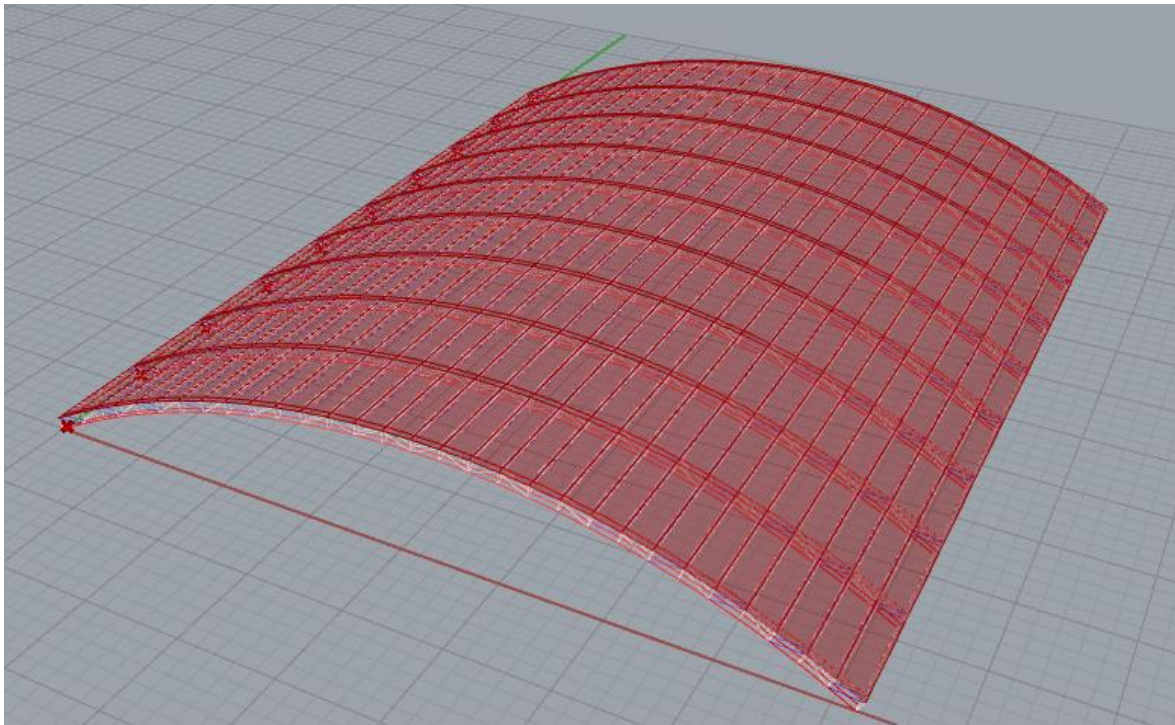


Figura 3.47. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°01- 10 arcos de celosía.

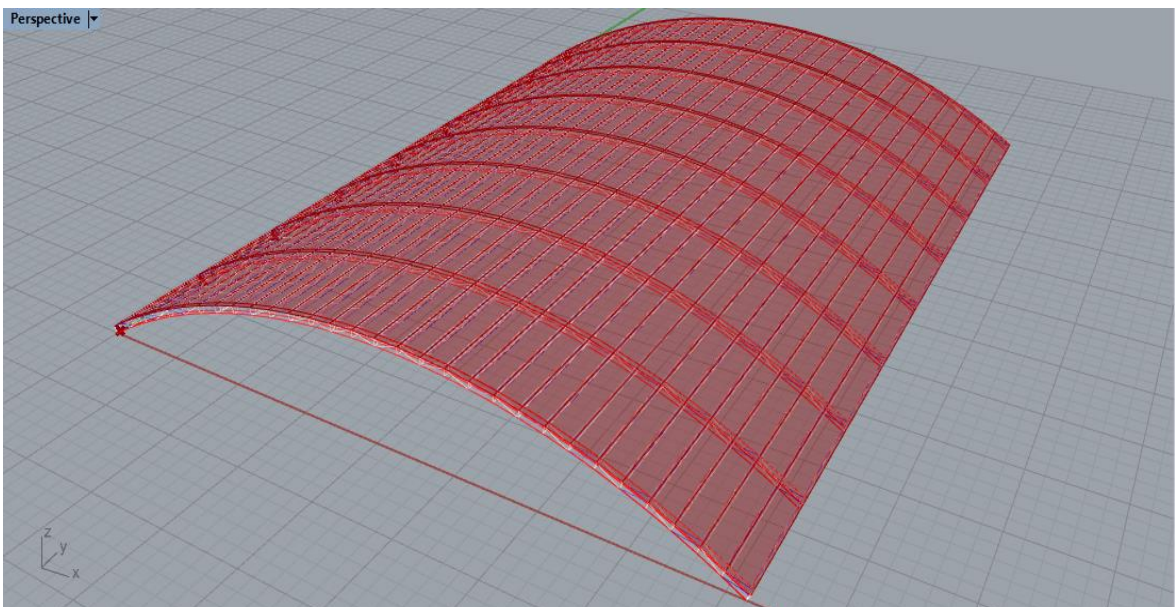


Figura 3.48. Cobertura metálica optimizada - Campo deportivo N°01- 09 arcos de celosía.

Tabla 3.14: Resultados de deflexiones en las viguetas obtenidas con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

	VIGUETAS 3D	
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION
Deflexión máxima (m)	0.0041	0.0086
Deflexión limite (m)	0.0304	0.0347

Tabla 3.15: Resultados de las secciones transversales en los elementos de las viguetas obtenidas con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

ELEMENTOS	SECCIONES TRANSVERSALES - HSRO (mm)	
	VIGUETAS 3D	
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION
Brida superior	26.7x2.5	26.7x1.8
Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
Brida inferior	26.7x2.5	26.7x1.8
Montante	26.7x2.5	26.7x1.8
Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8

3.5.2.2. Diseño en SAP 2000 de los arcos de celosía

Se diseñará un arco de viga de celosía en el software SAP 2000, dicho arco es tomado del modelado sin optimización; teniendo en cuenta el mismo material, la misma sección, las mismas cargas, mismos apoyos para poder realizar una comparación de ratios. Para mantener la misma geometría, se exportó el modelo desde Rhino hasta un archivo dwg y luego en la extensión dxf se exportó al SAP 2000.

A continuación, veamos la comparación que se realiza con los resultados:

Tabla 3.16: Resultados obtenidos para las bridas superiores con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS SUPERIORES	1	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800
	2	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800
	3	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800
	4	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800
	5	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	6	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	7	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	8	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	9	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	10	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	11	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	12	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	13	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	14	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	15	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	16	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	17	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	18	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	19	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	20	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	21	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	22	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	23	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	24	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	25	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	26	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	27	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	28	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	29	-59.2801	0.9298	-59.2520	0.9300
	30	-59.2801	0.9298	-59.2520	0.9300
	31	-59.2801	0.9298	-59.2520	0.9300
	32	-59.2801	0.9298	-59.2520	0.9300
	33	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	34	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	35	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	36	-58.6837	0.9205	-58.6560	0.9210
	37	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS SUPERIORES	38	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	39	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	40	-56.8976	0.8925	-56.8700	0.8930
	41	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	42	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	43	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	44	-53.9304	0.8459	-53.9030	0.8460
	45	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	46	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	47	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	48	-49.7967	0.7811	-49.7700	0.7810
	49	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	50	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	51	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	52	-44.5166	0.6983	-44.4910	0.6980
	53	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	54	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	55	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	56	-38.1159	0.5979	-38.0920	0.5980
	57	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800
58	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800	
59	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800	
60	-30.6258	0.4804	-30.6030	0.4800	

Tabla 3.17: Resultados obtenidos para las diagonales derecha con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.

ELEMENTO		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
		FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES DERECHA	N° DE ELEMENTO				
	1	-4.2431	0.4752	-4.2420	0.4747
	2	-4.2431	0.4752	-4.2420	0.4747
	3	-3.6520	0.4090	-3.6510	0.4086
	4	-3.6520	0.4090	-3.6510	0.4086
	5	-3.0430	0.3408	-3.0420	0.3405
	6	-3.0430	0.3408	-3.0420	0.3405
	7	-2.4191	0.2709	-2.4190	0.2707
	8	-2.4191	0.2709	-2.4190	0.2707
	9	-1.7835	0.1997	-1.7830	0.0998
	10	-1.7835	0.1997	-1.7830	0.0998
	11	-1.1391	0.1276	-1.1390	0.0637
	12	-1.1391	0.1276	-1.1390	0.0637
	13	-0.4892	0.0548	-0.4890	0.0274
	14	-0.4892	0.0548	-0.4890	0.0274
	15	0.1631	0.0033	0.1630	0.0016
	16	0.1631	0.0033	0.1630	0.0016
	17	0.8147	0.0165	0.8140	0.0082
	18	0.8147	0.0165	0.8140	0.0082
	19	1.4622	0.0295	1.4620	0.0148
	20	1.4622	0.0295	1.4620	0.0148
	21	2.1026	0.0425	2.1020	0.0212
	22	2.1026	0.0425	2.1020	0.0212
	23	2.7327	0.0552	2.7320	0.0276
	24	2.7327	0.0552	2.7320	0.0276
	25	3.3495	0.0676	3.3490	0.0338
	26	3.3495	0.0676	3.3490	0.0338
	27	3.9500	0.0798	3.9490	0.0399
	28	3.9500	0.0798	3.9490	0.0399
	29	4.5311	0.0915	4.5300	0.0457
30	4.5311	0.0915	4.5300	0.0457	

Tabla 3.18: Resultados obtenidos para las bridas inferiores con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	1	-117.3363	0.9530	-117.3590	0.9526
	2	-117.3363	0.9530	-121.1921	0.9526
	3	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	4	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	5	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	6	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	7	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	8	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	9	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	10	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	11	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	12	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	13	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	14	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	15	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	16	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	17	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	18	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	19	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	20	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	21	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	22	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	23	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	24	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	25	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	26	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	27	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	28	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	29	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
BRIDAS INFERIORES	30	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	31	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	32	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	33	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	34	-84.2026	0.6839	-84.2320	0.6837
	35	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	36	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	37	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	38	-85.4123	0.6937	-85.4410	0.6935
	39	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	40	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	41	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	42	-87.8259	0.7133	-87.8540	0.7131
	43	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	44	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	45	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	46	-91.4314	0.7426	-91.4590	0.7424
	47	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	48	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	49	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	50	-96.2114	0.7814	-96.2380	0.7812
	51	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	52	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	53	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	54	-102.1424	0.8296	-102.1680	0.8293
	55	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	56	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	57	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	58	-109.1955	0.8869	-109.2200	0.8865
	59	-117.3363	0.9530	-117.3590	0.9526
	60	-117.3363	0.9530	-117.3590	0.9526

Tabla 3.19: Resultados obtenidos para las montantes con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
MONTANTES	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	3	-4.0659	0.1118	-4.067	0.0559
	4	-4.0659	0.1118	-4.067	0.0559
	5	-3.8161	0.1050	-3.817	0.0525
	6	-3.8161	0.1050	-3.817	0.0525
	7	-3.8041	0.1046	-3.805	0.0523
	8	-3.8041	0.1046	-3.805	0.0523
	9	-3.5696	0.0982	-3.571	0.0491
	10	-3.5696	0.0982	-3.571	0.0491
	11	-3.5805	0.0985	-3.581	0.0492
	12	-3.5805	0.0985	-3.581	0.0492
	13	-3.3624	0.0925	-3.363	0.0462
	14	-3.3624	0.0925	-3.363	0.0462
	15	-3.3959	0.0934	-3.397	0.0467
	16	-3.3959	0.0934	-3.397	0.0467
	17	-3.1953	0.0879	-3.196	0.0439
	18	-3.1953	0.0879	-3.196	0.0439
	19	-3.2515	0.0894	-3.252	0.0447
	20	-3.2515	0.0894	-3.252	0.0447
	21	-3.0693	0.0844	-3.07	0.0422
	22	-3.0693	0.0844	-3.07	0.0422
	23	-3.1478	0.0866	-3.148	0.0433
	24	-3.1478	0.0866	-3.148	0.0433
	25	-2.9850	0.0821	-2.9860	0.0410
	26	-2.9850	0.0821	-2.9860	0.0410
	27	-3.0853	0.0849	-3.0860	0.0424
	28	-3.0853	0.0849	-3.0860	0.0424
	29	-2.9427	0.0809	-2.9430	0.0405
	30	-2.9427	0.0809	-2.9430	0.0405

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
MONTANTES	31	-3.0645	0.0843	-3.0640	0.0421
	32	-3.0645	0.0843	-3.0640	0.0421
	33	-2.9427	0.0809	-2.9430	0.0405
	34	-2.9427	0.0809	-2.9430	0.0405
	35	-3.0853	0.0849	-3.0850	0.0424
	36	-3.0853	0.0849	-3.0850	0.0424
	37	-2.9850	0.0821	-2.9850	0.0410
	38	-2.9850	0.0821	-2.9850	0.0410
	39	-3.1478	0.0866	-3.1480	0.0433
	40	-3.1478	0.0866	-3.1480	0.0433
	41	-3.0693	0.0844	-3.07	0.0422
	42	-3.0693	0.0844	-3.07	0.0422
	43	-3.2515	0.0894	-3.252	0.0447
	44	-3.2515	0.0894	-3.252	0.0447
	45	-3.1953	0.0879	-3.196	0.0439
	46	-3.1953	0.0879	-3.196	0.0439
	47	-3.3959	0.0934	-3.397	0.0467
	48	-3.3959	0.0934	-3.397	0.0467
	49	-3.3623	0.0925	-3.363	0.0462
	50	-3.3623	0.0925	-3.363	0.0462
	51	-3.5805	0.0985	-3.581	0.0492
	52	-3.5805	0.0985	-3.581	0.0492
	53	-3.5696	0.0982	-3.571	0.0491
	54	-3.5696	0.0982	-3.571	0.0491
	55	-3.8041	0.1046	-3.805	0.0523
	56	-3.8041	0.1046	-3.805	0.0523
	57	-3.8161	0.1050	-3.817	0.0525
	58	-3.8161	0.1050	-3.817	0.0525
	59	-4.0659	0.1118	-4.067	0.0559
	60	-4.0659	0.1118	-4.067	0.0559
	61	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	62	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 3.20: Resultados obtenidos para las diagonales izquierda con el guide desarrollado y SAP 2000– Cobertura sin optimización– Campo deportivo N°01.

		ARCO DE CELOSIA SIN OPTIMIZACION			
		GUIDE DESARROLLADO		SAP 2000	
ELEMENTO	N° DE ELEMENTO	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS	FUERZAS ACTUANTES (KN)	RATIOS
DIAGONALES IZQUIERDA	1	4.5311	0.0915	4.53	0.0457
	2	4.5311	0.0915	4.53	0.0457
	3	3.9500	0.0798	3.949	0.0399
	4	3.9500	0.0798	3.949	0.0399
	5	3.3495	0.0676	3.349	0.0338
	6	3.3495	0.0676	3.349	0.0338
	7	2.7327	0.0552	2.732	0.0276
	8	2.7327	0.0552	2.732	0.0276
	9	2.1026	0.0425	2.102	0.0998
	10	2.1026	0.0425	2.102	0.0998
	11	1.4622	0.0295	1.462	0.0148
	12	1.4622	0.0295	1.462	0.0148
	13	0.8147	0.0165	0.814	0.0082
	14	0.8147	0.0165	0.814	0.0082
	15	0.1631	0.0033	0.163	0.0016
	16	0.1631	0.0033	0.163	0.0016
	17	-0.4892	0.0548	-0.489	0.0274
	18	-0.4892	0.0548	-0.489	0.0274
	19	-1.1391	0.1276	-1.139	0.0637
	20	-1.1391	0.1276	-1.139	0.0637
	21	-1.7835	0.1997	-1.783	0.0998
	22	-1.7835	0.1997	-1.783	0.0998
	23	-2.4191	0.2709	-2.419	0.2707
	24	-2.4191	0.2709	-2.419	0.2707
	25	-3.0430	0.3408	-3.042	0.3405
	26	-3.0430	0.3408	-3.042	0.3405
	27	-3.6520	0.4090	-3.651	0.4086
	28	-3.6520	0.4090	-3.651	0.4086
	29	-4.2431	0.4752	-4.242	0.4747
	30	-4.2431	0.4752	-4.242	0.4747

Nota:

- Las ratios que son menores a 0.2; SAP 2000 aplica el criterio de considerar la mitad del ratio de diseño (establecido en la fórmula H1-1b de la AISC 360 – 16), pero esto se aplica a miembros con simetría doble y simple solicitados a flexión y compresión, sin embargo los elementos de las armaduras (arcos y viguetas) solo están sometidos a tensión y/o compresión; por ello el guide no considera el criterio de SAP 2000. Así que si multiplicamos por 2 los ratios menores a 0.2 obtenidos en SAP 2000, resultan muy parecidos a los resultados del guide.

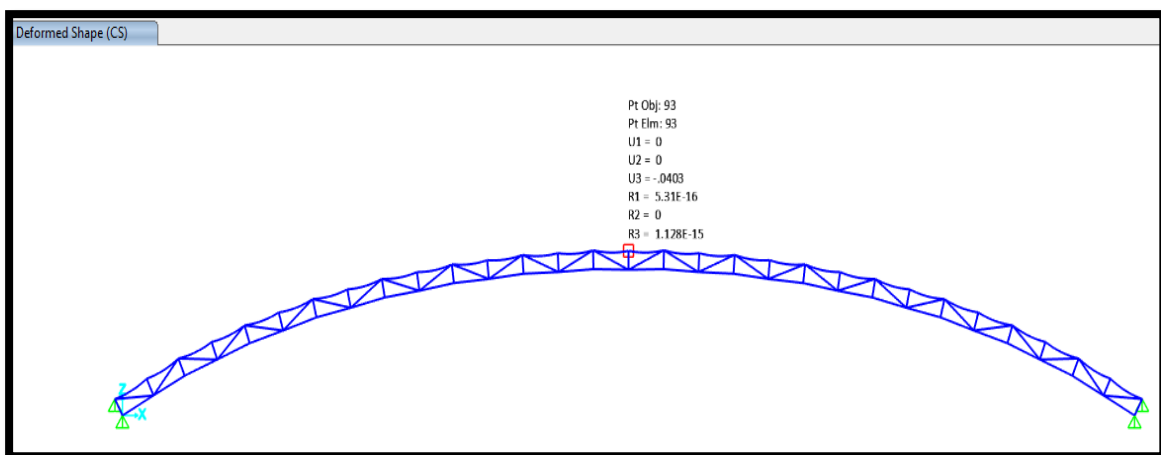


Figura 3.49. Deflexión máxima de arco de celosía (brida superior-nodo central) obtenida en SAP 2000 - Campo deportivo N°01.

Tabla 3.21: Resultados de deflexiones en los arcos de celosía obtenidas con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°01.

	ARCOS DE CELOSIA		
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION		COBERTURA CON OPTIMIZACION
	GUIDE CREADO	SAP 2000	GUIDE CREADO
Deflexión máxima (m)	0.0322	0.0403	0.0352
Deflexión limite (m)	0.227	-	0.227

Tabla 3.22: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°01.

TIEMPO EN MIN	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION	VARIACION EN %
	PESO EN KG		
30	21,577.25	17,542.61	18.70%
75		16,238.87	24.74%
120		15,966.37	26.00%

3.5.2.3. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 02:

Figura 3.50. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°02.

✓ Resultados para arcos y viguetas

Luego de realizar la optimización de tamaño, geometría y cantidad con el plugin Galápagos, obtenemos los siguientes resultados:

Figura 3.51. Características geométricas de la cobertura de la solución óptima final - Campo deportivo N°02.

Tabla 3.23: Resultados de diseño (Fuerzas internas mínimas y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°02.

	FUERZAS INTERNAS							
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION				COBERTURA CON OPTIMIZACION			
	COMPRESION (KN)		TENSION (KN)		COMPRESION (KN)		TENSION (KN)	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
ARCOS	0.429	88.8002	0.1433	3.3985	0.4209	90.4316	0.1404	3.329
VIGUETAS	0.0528	9.6552	0.013	22.755	0.0057	14.3189	0.0057	31.692

Tabla 3.24: Resultados de diseño (secciones transversales) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°02.

	ELEMENTOS	SECCIONES TRANSVERSALES - HSRO (mm)	
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION
ARCOS DE CELOSIA	Brida superior	60.3x1.8	60.3x1.8
	Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
	Brida inferior	60.3x3.9	60.3x3.2
	Montante	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8
	Enlaces	26.7x1.8	26.7x1.8
VIGUETAS	Brida superior	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
	Brida inferior	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8

Tabla 3.25: Resultados de diseño (deflexiones límites y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°02.

	DEFLEXIONES			
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION		COBERTURA CON OPTIMIZACION	
	LIMITE	MAXIMA	LIMITE	MAXIMA
ARCOS	0.1944	0.0194	0.1944	0.0238
VIGUETAS	0.0305	0.0042	0.0121	0.0349

Tabla 3.26: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°02.

TIEMPO EN MIN	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION	VARIACION EN %
	PESO EN KG		
30	18,649.818	13,633.5	26.90%
75		13,223.46	29.10%
125		13,220.63	29.11%

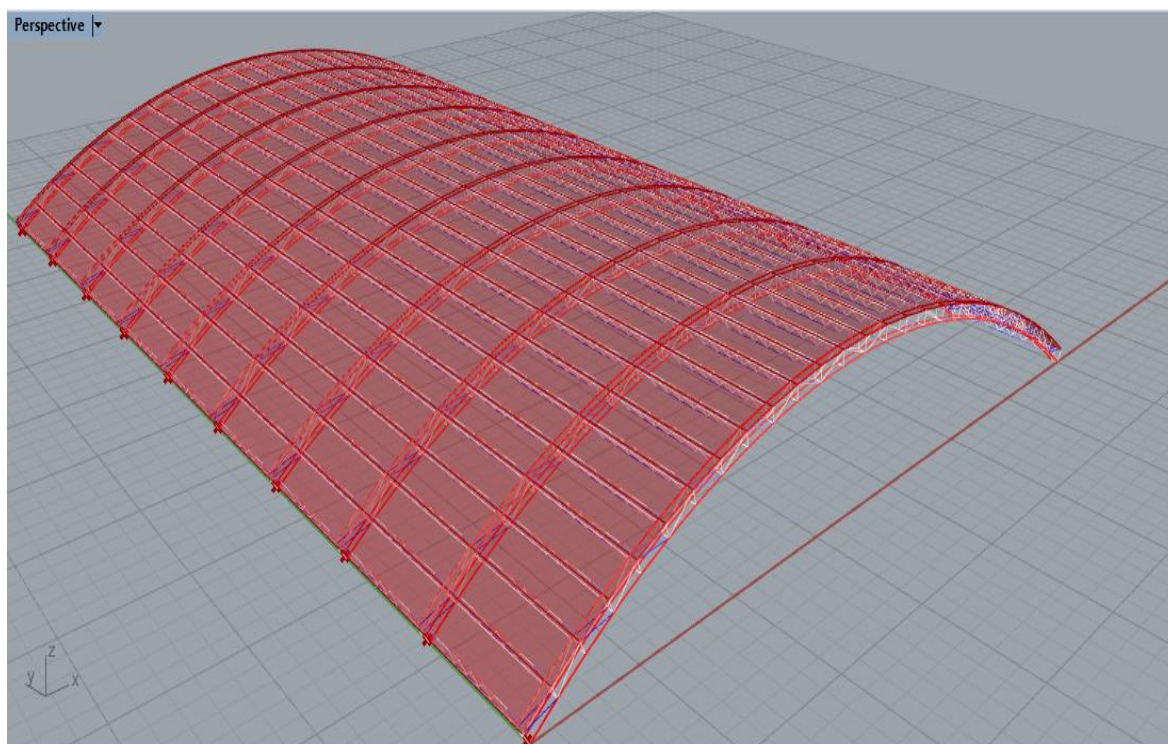


Figura 3.52. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°02 – 10 arcos de celosía.

✓ **Resultados para arcos y viguetas**

Luego de realizar la optimización de tamaño, geometría y cantidad con el plugin Galápagos, obtenemos los siguientes resultados:

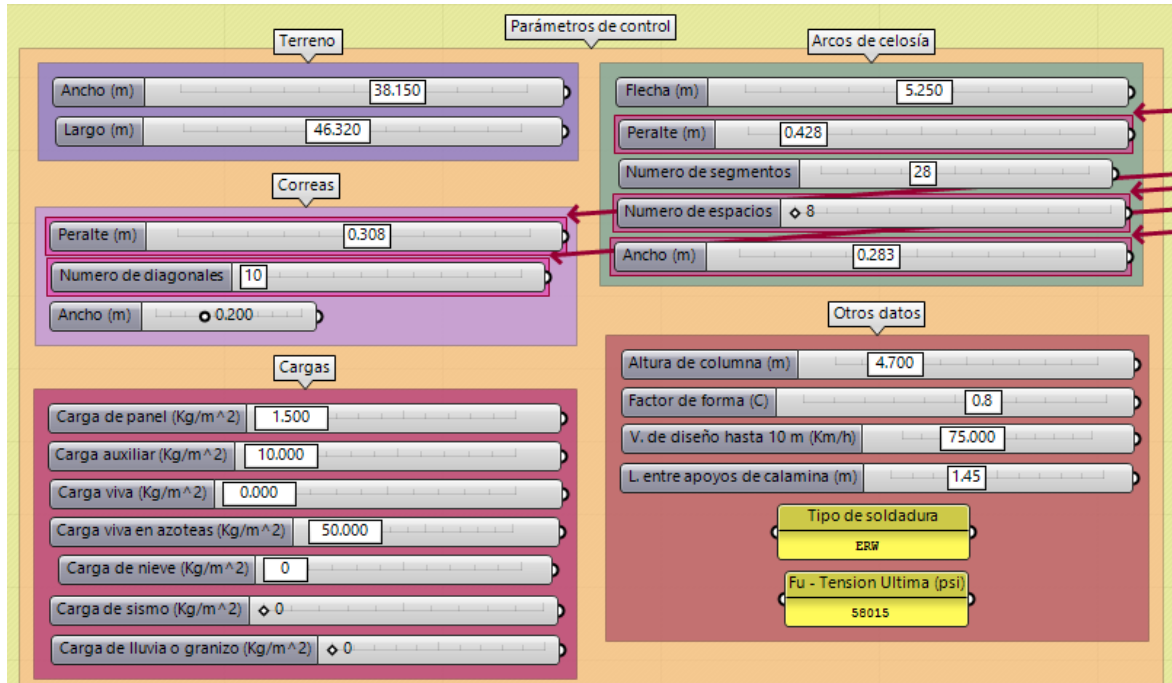


Figura 3.55. Características geométricas de la cobertura de la solución óptima final - Campo deportivo N°03.

Tabla 3.27: Resultados de diseño (Fuerzas internas mínimas y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°03.

	FUERZAS INTERNAS							
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION				COBERTURA CON OPTIMIZACION			
	COMPRESION (KN)		TENSION (KN)		COMPRESION (KN)		TENSION (KN)	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
ARCOS	0.1594	104.205	0.4779	4.1139	0.1167	92.3691	0.3499	3.0119
VIGUETAS	0.00735	6.8389	0.00735	20.239	0.0057	14.3189	0.0057	31.692

Tabla 3.28: Resultados de diseño (secciones transversales) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°03.

	ELEMENTOS	SECCIONES TRANSVERSALES - HSRO (mm)	
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION
ARCOS DE CELOSIA	Brida superior	60.3x1.8	60.3x1.8
	Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
	Brida inferior	60.3x3.9	60.3x3.2
	Montante	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8
	Enlaces	26.7x1.8	26.7x1.8
VIGUETAS	Brida superior	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
	Brida inferior	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8

Tabla 3.29: Resultados de diseño (deflexiones límites y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°03.

	DEFLEXIONES			
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION		COBERTURA CON OPTIMIZACION	
	LIMITE	MAXIMA	LIMITE	MAXIMA
ARCOS	0.2119	0.0261	0.2119	0.0287
VIGUETAS	0.0299	0.0039	0.0304	0.0053

Tabla 3.30: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°03.

TIEMPO EN MIN	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION	VARIACION EN %
	PESO EN KG		
30	17837.1027	14874.77	16.61%
75		14295.84	19.85%
120		13342.17	25.20%

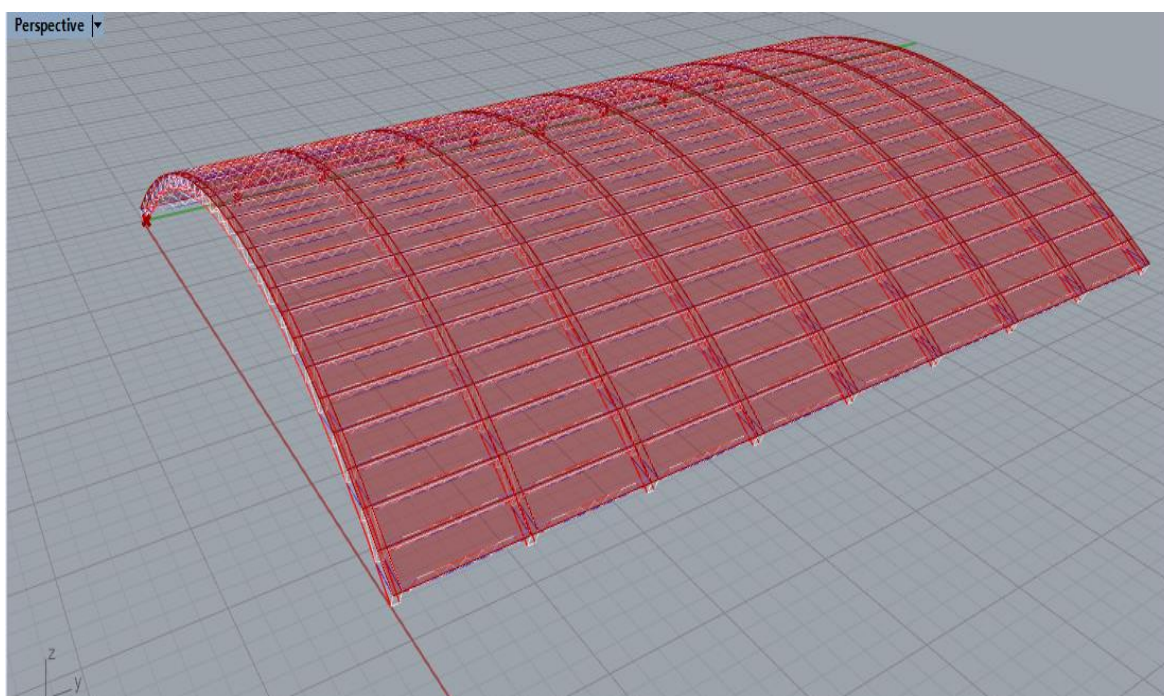


Figura 3.56. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°03 – 09 arcos de celosía.

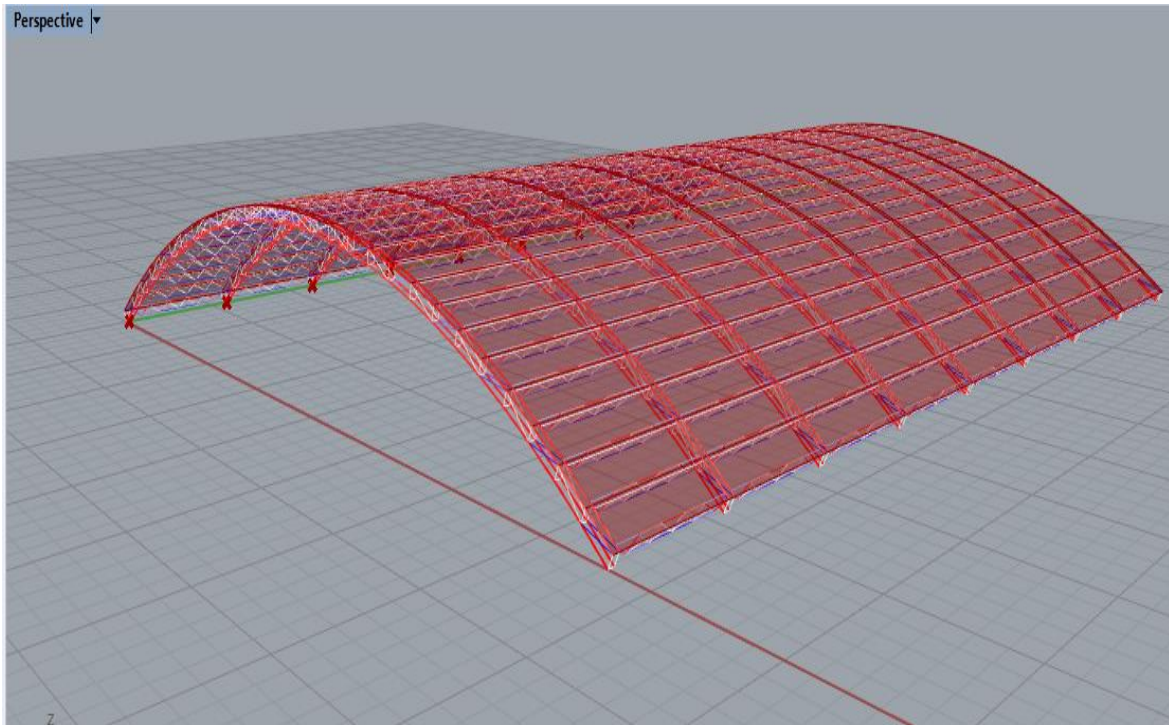


Figura 3.57. Cobertura metálica con optimización - Campo deportivo N°03 – 09 arcos de celosía.

3.5.2.5. Resultados del ejemplo aplicativo – Campo deportivo N° 04:

Terreno	Parámetros de control	Arcos de celosía
Ancho (m) <input type="text" value="44.360"/>		Flecha (m) <input type="text" value="5.150"/>
Largo (m) <input type="text" value="56.500"/>		Peralte (m) <input type="text" value="0.660"/>
		Numero de segmentos <input type="text" value="32"/>
		Numero de espacios <input type="text" value="10"/>
		Ancho (m) <input type="text" value="0.400"/>
		Otros datos
		Altura de columna (m) <input type="text" value="4.650"/>
		Factor de forma (C) <input type="text" value="0.8"/>
		V. de diseño hasta 10 m (Km/h) <input type="text" value="75.000"/>
		L. entre apoyos de calamina (m) <input type="text" value="1.45"/>
		Tipo de soldadura
		<input type="text" value="ERW"/>
		Fu - Tension Ultima (psi)
		<input type="text" value="58015"/>

Viguetas	Cargas
Peralte (m) <input type="text" value="0.280"/>	Carga de panel (Kg/m ²) <input type="text" value="1.500"/>
Numero de diagonales <input type="text" value="16"/>	Carga auxiliar (Kg/m ²) <input type="text" value="10.000"/>
Ancho (m) <input type="text" value="0.200"/>	Carga viva (Kg/m ²) <input type="text" value="0.000"/>
	Carga viva en azoteas (Kg/m ²) <input type="text" value="50.000"/>
	Carga de nieve (Kg/m ²) <input type="text" value="0"/>
	Carga de sismo (Kg/m ²) <input type="text" value="0"/>
	Carga de lluvia o granizo (Kg/m ²) <input type="text" value="0"/>

Figura 3.58. Panel de control del guide desarrollado para el diseño de cobertura sin optimización del Campo deportivo N°04.

✓ **Resultados para arcos y viguetas**

Luego de realizar la optimización de tamaño, geometría y cantidad con el plugin Galápagos, obtenemos los siguientes resultados:

Figura 3.59. Características geométricas de la cobertura de la solución óptima final - Campo deportivo N°04.

Tabla 3.31: Resultados de diseño (Fuerzas internas mínimas y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°04.

	FUERZAS INTERNAS							
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION				COBERTURA CON OPTIMIZACION			
	COMPRESION (KN)		TENSION (KN)		COMPRESION (KN)		TENSION (KN)	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
ARCOS	0.1772	150.905	0.5315	5.3171	0.1095	118.088	0.3284	3.2851
VIGUETAS	0.00686	7.2946	0.0092	21.876	0.0001	6.2725	0.0001	19.585

Tabla 3.32: Resultados de diseño (secciones transversales) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°04.

	ELEMENTOS	SECCIONES TRANSVERSALES - HSRO (mm)	
		COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION
ARCOS DE CELOSIA	Brida superior	60.3x1.8	60.3x1.8
	Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
	Brida inferior	60.3x3.9	60.3x3.9
	Montante	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8
	Enlaces	26.7x1.8	26.7x1.8
VIGUETAS	Brida superior	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal derecha	26.7x2.5	26.7x1.8
	Brida inferior	26.7x2.5	26.7x1.8
	Diagonal izquierda	26.7x2.5	26.7x1.8

Tabla 3.33: Resultados de diseño (deflexiones límites y máximas) obtenidos con el guide desarrollado – Cobertura sin optimización y con optimización– Campo deportivo N°04.

	DEFLEXIONES			
	COBERTURA SIN OPTIMIZACION		COBERTURA CON OPTIMIZACION	
	LIMITE	MAXIMA	LIMITE	MAXIMA
ARCOS	0.2664	0.0369	0.2464	0.0412
VIGUETAS	0.0289	0.0039	0.0267	0.0047

Tabla 3.34: Pesos obtenidos con el guide desarrollado en diferentes intervalos de tiempos - Cobertura sin optimización y con optimización de tamaño, geometría, cantidad - Campo deportivo N°04.

TIEMPO EN MIN	COBERTURA SIN OPTIMIZACION	COBERTURA CON OPTIMIZACION	VARIACION EN %
	PESO EN KG		
30	26784.3961	20815.87	22.28%
75		20519.96	23.39%
135		20200.56	24.58%

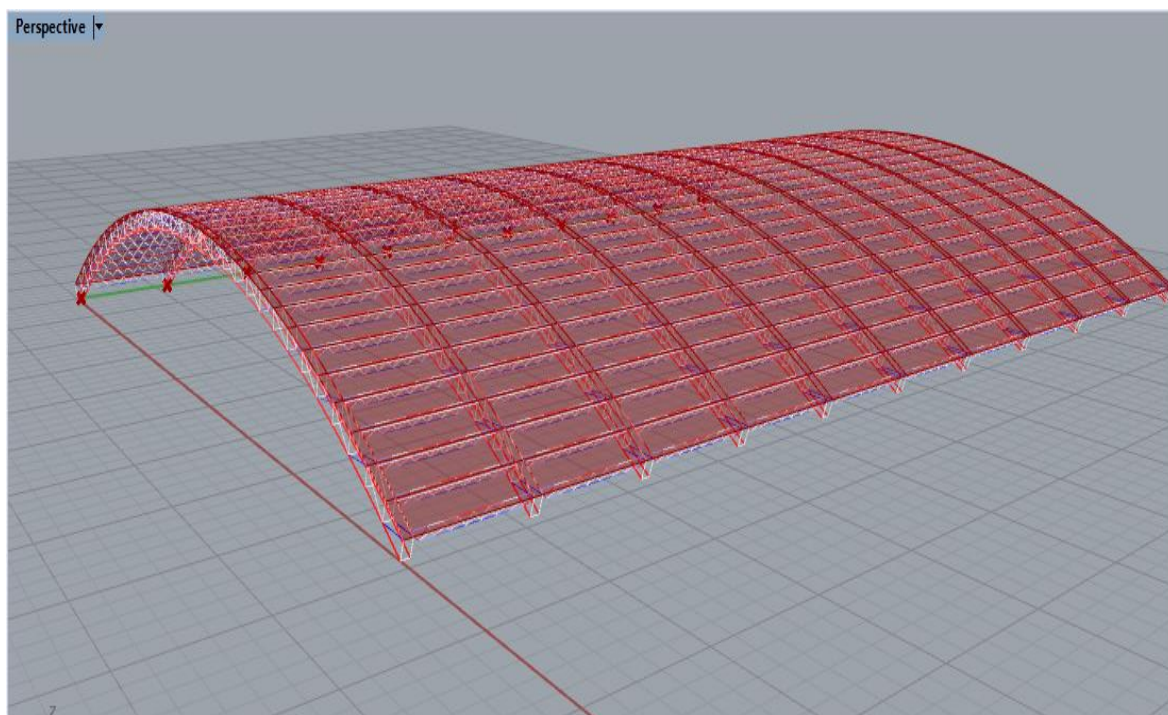


Figura 3.60. Cobertura metálica sin optimización - Campo deportivo N°04.

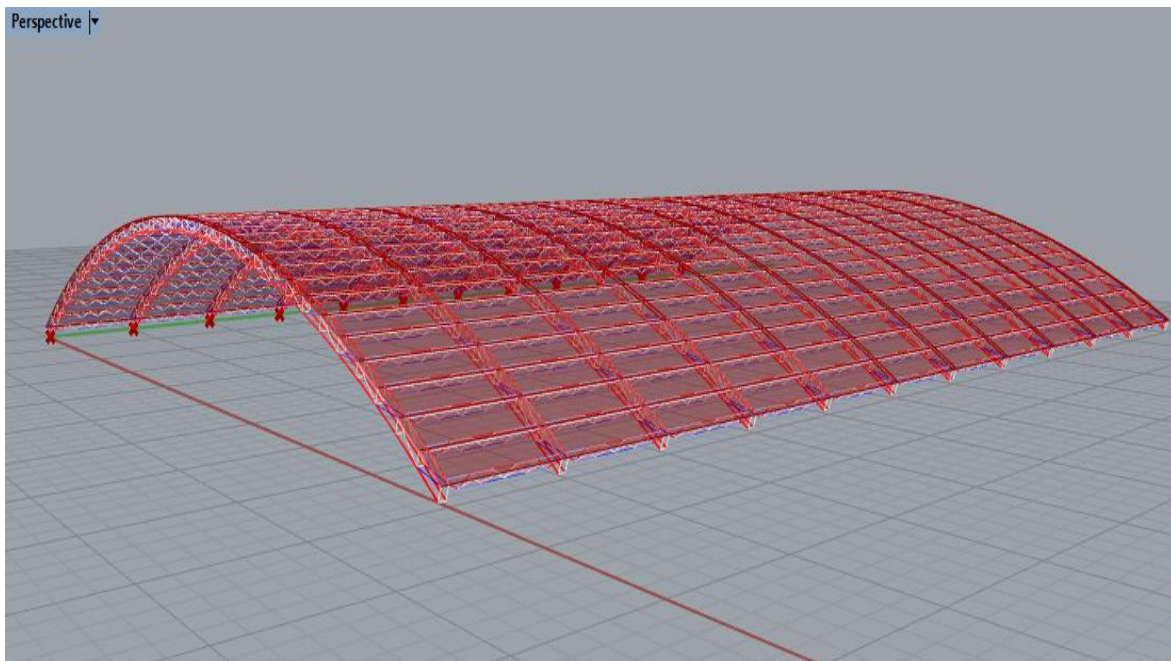


Figura 3.61. Cobertura metálica con optimización - Campo deportivo N°04

Tabla 3.35: Cuadro con los promedios del tiempo óptimo y porcentaje de peso optimizado del ejemplo aplicativo en el guide desarrollado.

	OPTIMIZACION DE TAMAÑO, GEOMETRIA Y CANTIDAD				PROMEDIO
	CAMPO DEPORTIVO N°				
	01	02	03	04	
TIEMPO EN MIN	120	125	120	135	125
PORCENTAJE DE PESO OPTIMIZADO (%)	23.15	28.37	20.55	23.42	23.87

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- En los cuatro modelos (campos deportivos) del ejemplo aplicativo se utilizó para los arcos de viga de celosía la configuración Warren con montantes consecutivas y para las viguetas tridimensionales se utilizó la configuración Warren simple con sección triangular. Este tipo de configuración predeterminada impide de cierta forma realizar la optimización topológica, ya que se buscará que los elementos obtenidos tengan una secuencia y configuración lógica. Esto queda en manifiesto en la tesis de Colunche (2019) en la cual solo logra optimizar el peso de sus coberturas metálicas con configuraciones estructurales predefinidas en 0.14% cuando aplica la optimización topológica (eliminación de elementos menos forzados) y recomienda no aplicar este tipo de optimización ya que el porcentaje de peso disminuido es mínimo y el tiempo que demora para realizar este proceso es excesivo, 45 min aproximadamente.

- La optimización de tamaño, es uno de los parámetros de salida del guide, y consiste en que el programa elija eficientemente los perfiles para cada elemento de la estructura. Se cuenta con una amplia lista de secciones comerciales de perfiles circulares que corresponden a otros países y que también se pueden encontrar en nuestro país, sin embargo, se tuvieron que añadir secciones más pequeñas contempladas en los catálogos de Aceros Arequipa y Miromina para ser utilizadas en los elementos que tienen ratios de diseño muy bajos como en el caso de las diagonales, montantes y enlaces y de esta manera reducir aún más el porcentaje de peso optimizado. En esta investigación se hizo uso de los perfiles tubulares circulares, ya que, según la vasta bibliografía, muchos autores demuestran la eficiencia de estos perfiles por sus altos niveles de resistencia al pandeo cuando se somete a compresión en comparación con otras secciones (Bonelli y Gudiño 2018) y a su vez permiten obtener diseños óptimos de estructuras metálicas al reducir la cantidad de material (Escobar 2019).

- La optimización de geometría permite obtener resultados muy favorables en las variaciones de los siguientes parámetros: peralte, ancho, número de diagonales. Por ejemplo, en el primer modelo de cobertura- campo deportivo N°01, el peralte inicial del arco de celosía en la cobertura sin optimización es 0.61 m y luego de la

optimización el peralte es 0.41 m, disminuyendo aproximadamente en un 30%; el ancho de la viga de celosía, de la dimensión inicial de 0.37 m pasa a 0.33 m, obteniendo una variación aproximada del 11%. En las viguetas tridimensionales, no se puede apreciar las variaciones en cuanto al peralte, la variación más significativa que influye en la reducción del peso es la disminución del número de diagonales pasando inicialmente de 16 a 10. En porcentajes similares disminuyen los parámetros antes mencionados en los tres modelos restantes.

- La optimización de cantidad se refiere al número de arcos que conforman la cobertura metálica. En los dos primeros modelos del ejemplo aplicativo, observamos que la cantidad de arcos ha disminuido en uno, para el tercer modelo se ha mantenido igual, sin embargo, para el cuarto modelo, ha aumentado el número de arcos en uno. Esto se debe a que el programa va buscando las mejores soluciones y que además el diseño cumpla con la norma AISC 360-16 y que la deflexión máxima no supere la deflexión límite establecida en la Norma Técnica de edificaciones E0.20 – Cargas. El porcentaje de optimización para este último modelo ha sido de 23.42%, lo que significa que, para este caso, la optimización de cantidad no ha influido en nada para la disminución de peso, lo que sí ha tenido mucha preponderancia es la optimización de geometría o forma.
- Al comparar los resultados obtenidos entre las coberturas metálicas sin optimización y las coberturas metálicas con optimización, notamos que los ratios de diseño aumentan en cada uno de los elementos, pero es en las bridas inferiores en donde se nota la máxima eficiencia de la resistencia del material frente a las fuerzas internas producidas por las cargas actuantes, ya que los ratios son muy cercanos a 1 (Tabla 3.6.).
- Utilizando el guide desarrollado, los pesos optimizados superan el 20%, quedando así, validada la hipótesis. Este porcentaje está dentro de los rangos que otros investigadores mencionados en los antecedentes, han logrado al optimizar el peso de estructuras metálicas bidimensionales y tridimensionales, utilizando la técnica metaheurística de los algoritmos genéticos.

- El tiempo promedio que se requirió para la optimización simultánea de toda la cobertura metálica es de 02 horas y 05 min (125 min). Este tiempo es menor al obtenido por Colunche (2019): 02 horas y 45 min, cuando optimizó una cobertura metálica compuesta por armaduras bidimensionales, esto se debe a que en esta investigación se realizó un predimensionamiento previo de la geometría de los arcos y viguetas. Es por ello que, para evitar prolongar el tiempo de optimización, se recomienda colocar las características geométricas con cierto criterio. Cabe recalcar que el tiempo también depende de la cantidad de parámetros a optimizar.

- Se tomó el modelo N° 01 (campo deportivo) del ejemplo aplicativo para poder realizar la comparación de resultados del guide desarrollado con el programa tradicional SAP 2000. Se compararon las fuerzas internas y los ratios de diseño de cada uno de los elementos del arco de viga de celosía y los resultados son muy parecidos, teniendo pequeñas variaciones en los decimales.

- Se reitera las bondades que nos ofrece Rhinoceros 3D y sus complementos Grasshopper, Karamba y Galápagos, puesto que gracias a los algoritmos que tienen incorporados permiten manipular las formas geométricas, he ahí la importancia del control de magnitud deslizante “slider” en la generación de nuevos modelos paramétricos lo que significa que es adaptable a diversos proyectos. Además, Rhinoceros permite la interacción con otros programas BIM.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Optimizando el peso de las armaduras espaciales en Rhinoceros 3D, se reduce el peso en un porcentaje de 23.87%, el cual es mayor al 20%, quedando validada la hipótesis.
- El tiempo promedio empleado por el guide, para optimizar el peso de las coberturas metálicas presentadas en el ejemplo aplicativo es de 2 horas con 05 min (125 min).
- Los resultados de diseño obtenidos en el programa Karamba se diferencian en milésimas con los resultados obtenidos con el programa SAP 2000 por lo que queda demostrado la veracidad de los resultados que se obtienen con el guide desarrollado.

5.2. RECOMENDACIONES

- Incorporar cada vez más el uso de las herramientas paramétricas avanzadas, aprovechando sus ventajas (cuentan con sus propios algoritmos biológicos) para lograr diseños flexibles y óptimos.
- Ampliar la creación de guides para el diseño y optimización de elementos paramétricos como puentes, pórticos, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AISC (American Institute of Steel Construction). 2016. Especificaciones para Construcciones de Acero Estructural. Chicago, Estados Unidos. 28 de marzo.
- ASCESCO.s.f. Procesos de soldadura. 4 ed. Malambo, Colombia. 9 p.
- Bonelli, M; Gudiño, SA. 2016. Optimización Estructural y Topológica de Armaduras mediante Algoritmos Genéticos. Revista de Tecnología y Ciencia (32): 287-296.
- Borda Galindo, EA. 2020. Programa para optimización en peso de armaduras de acero mediante algoritmos genéticos. Tesis Master. Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú. 160 p.
- Calheiros Brito, JD. 2014. Processos integrados de modelação, análise e otimização de projetos na aec. Tesis master. Porto, Brasil, Universidade Do Porto. 131 p.
- Capote, V. 2010. Procesos de soldadura. Temas para la Educación (6): 1-14.
- Cervera, M; Blanco, E. 2002. Mecánica de Estructuras: Fundamentos de Análisis de Estructuras. 2 ed. Barcelona, España, Edicions UPC. 341 p.
- Chávez Zelaya, AJ. 2008. Manual para el Diseño de Armaduras Metálicas Planas. Tesis Master. Tegucigalpa, Honduras, UNITEC. 194 p.
- Christensen, P; Klarbring, A. 2009. An Introducción to Structural Optimization. 1 ed. New York, EE.UU, Springer Verlag. 214 p.
- CIMCO (Especialistas en CAD/CAM Y Metrología 3D). 2019. Rhinoceros Modelador de formas libres en 3D (en línea, sitio web). Consultado 12 de enero del 2021. Disponible en <https://www.cimco.mx/productos/software-diseno-ingenieria/software-modelado-3d-diseno-industrial/#1532555081901-64f20629b1c3>
- Coello, C. 1994. Uso de Algoritmos Genéticos para el Diseño Óptimo de Armaduras. In Congreso Nacional de Informática “Herramientas Estratégicas para los Mercados Globales”. México, México. Consultado el 03 de noviembre del 2020. Disponible en <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/1994.html>.
- Colunche Núñez, WF. 2019. Optimización del Peso de Coberturas Metálicas Paramétricas usando Rhinoceros 3D. Tesis pregrado. Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca. 159 p.

- Diaz Briceño, KR. 2014. Evaluación y optimización en el diseño de estructuras metálicas aplicado a cubiertas según las especificaciones AISC- 2010 por el Método LRFD. Tesis pregrado. Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca. 234 p.
- Escobar Curasma, KA. 2019. Optimización del diseño de estructuras de acero en cobertura mediante el método de algoritmos genéticos. Tesis pregrado. Huancavelica, Perú, Universidad Nacional de Huancavelica. 234 p.
- Espejo San Román, J. 1971. Coberturas livianas con arcos metálicos de celosía. Lima, Perú.
- Exsa/Oerlikon.s.f. Manual de Soldadura y Catálogo de Productos. 6 ed. Lima, Perú. 299 p.
- Gestal, M. s.f. Introducción a los Algoritmos Genéticos. Coruña, España. 16 p.
- Google Trends, 2021. Descubre qué busca el mundo. (en línea, sitio web). Consultado 04 de abril del 2021. Disponible en DIGITAL PROJECTS, Grasshopper 3D, Generative Components - Explorar - Google Trends
- Google Trends, 2021. Descubre qué busca el mundo. (en línea, sitio web). Consultado 04 de abril del 2021. Disponible en Revit, ArchiCAD, vectorworks - Explorar - Google Trends
- Gonzales Ramírez, JA. 2018. Diseño integral de armaduras metálicas usando Rhinoceros 3D: Modelación paramétrica, simulación estructural y optimización Tesis pregrado. Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca. 310 p.
- Grasshopper 3D (Modelado Algorítmico para Rhino). c2021. Solucionador Evolutivo de Galápagos (en línea, sitio web). Consultado 04 de enero del 2021. Disponible en <https://www.grasshopper3d.com/group/galapagos>
- Gutiérrez Astudillo, NC. 2010. Algoritmos genéticos aplicados al diseño estructural de armaduras en tres dimensiones. Tesis Dr. Querétaro, México, Universidad Autónoma de Querétaro. 139 p.
- Gürsel, I. 2012. Creative Design Exploration by Parametric Generative Systems in Architecture. Metu 29(1):207-224.
- ITEA (Instituto Técnico de la Estructura de Acero). S.f. Estructuras Tubulares: Propiedades Mecánicas y Geométricas de los Perfiles Tubulares. España, España. 105 p.
- Karamba 3D (Ingeniería Paramétrica). c2021. Colección de ejemplos de Karamba 3D (en línea, sitio web). Disponible en <https://www.karamba3d.com/examples/>

- Kociecky, M; Hojjat, A. 2013. “Algoritmo genético de dos fases para la optimización del tamaño de estructuras de techo de estructura espacial de acero de forma libre”, (en línea). Revista de Aplicaciones de la Ingeniería de la Inteligencia Artificial 90:283-296. Consultado el 04 de enero del 2021. Disponible en DOI: 10.1016 / j.jcsr.2013.07.027
- Kociecky, M; Hojjat, A. 2015. Optimización de la forma de estructuras de techo de estructura espacial de acero de forma libre con geometrías complejas utilizando computación evolutiva (en línea). Revista de Aplicaciones de la Ingeniería de la Inteligencia Artificial 38:168-182. Consultado el 04 de enero del 2021. Disponible en DOI: 10.1016 / j.engappai.2014.10.012
- Kolarevic, B. 2003. Architecture in the digital age: Design and Manufacturing. Pennsylvania, Spon Press. 320 p.
- Kolling Andersen, D. 2015. Parametric Modelling for Point Support Optimisation of Plate and Shell Structures. Tesis master. Kongens Lyngby, Dinamarca, DTU. 112 p.
- Lagios, K; Niemasz, J; Reinhart, C. 2010. Animated Building Performance Simulation (ABPS)-linking rhinoceros/grasshopper with radiance/daysim. Fourth National Conference of IBPSA-USA. 1(1):321-327.
- Loja González, JA. 2014. Algoritmos genéticos como herramientas en el proceso de diseño generativo. Tesis pregrado, Loja, Ecuador, Universidad Técnica Particular de Loja. 167 p.
- Machicao Mamani, LY. 2015. Modelo de análisis comparativo para la optimización del diseño de armaduras de techos en la ciudad de Juliaca. Tesis pregrado. Juliaca, Perú, Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez”.374 p.
- Master 3Digital Architecture. 2015. DDD Rhinoceros y Grashopper. (en línea, sitio web). Consultado 12 de enero del 2021. Disponible en <https://www.treddi.com/cms/news/ddd-2015-rhinoceros-amp-grasshopper/2418>
- McNeel, R. 2001. Rhinoceros modelador Nurbs para Windows, Manual de Introducción. Seattle, EE.UU, Robert McNeel & Associates. 85p.
- Namoncura, C; Vásquez, M. 2014. Optimización de formas arquitectónicas con algoritmos genéticos “OTAG”. Tesis pregrado, Concepción, Chile, Instituto Profesional Virginio Gómez de la Universidad de Concepción. 179 p.

- Nuñez, L. ¿Qué son los algoritmos genéticos? (en línea). *El País, Cali, España*; 6 de febrero del 2019. Consultado el 25 de noviembre del 2020. Disponible en https://elpais.com/elpais/2019/01/31/ciencia/1548933080_909466.html
- Orozco, SD. 2007. Elaboración de pronósticos con algoritmos genéticos. Tesis pregrado. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Preisinger, C. 2013. Estructura de enlaces y geometría paramétrica (en línea). *Revista de Diseño de arquitectura* 83: 110-113. Consultado el 13 de diciembre 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ad.1564>
- Ramírez Echeverri, S. 2014. Metodología basada en Algoritmos Genéticos y Programación en Paralelo para el Diseño Óptimo de Armaduras de Acero. Tesis Master. Bogotá, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana. 158 p.
- Rhinoceros Forums. 2018. Sobre Karamba 3D (en línea, sitio web). Consultado 12 de enero del 2021. Disponible en <https://discourse.mcneel.com/t/about-karamba-3d/58754>
- Richardson, J. 2010. Multicriteria Topology Optimization of Discrete. Bruselas, Bélgica, Vrije Universiteit Brussel.
- Sánchez Caballero, S. 2012. Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos. Tesis Dr. Valencia, España, Universidad Politécnica de Valencia. 373 p.
- Sivanandam, SN; Deepa, SN. 2008. Introduction to Genetic Algorithms: Terminologies and Operators of AG. 1 ed. Berlin, Alemania, Springer Berlin Heidelberg. 129 p.
- Skyciv (Software de Análisis y Diseño Estructural, Sydney). c2015. Skyciv: Tipos de Estructuras de Armadura (en línea, sitio web). Consultado 10 enero 2021. Disponible en <https://skyciv.com/es/education/types-of-trusses/>
- Tomassini, M. 1995. A survey of genetic algorithms. *Annual Reviews of Computational Physics*, 3:87-118.
- USI (United Steel Industry, Jiangsu). 2018. Tubo Estructural ASTM A500 (en línea, sitio web). Consultado 10 enero 2021. Disponible en <https://www.united-steel.com/es/newsshow/363.html>

- Valdiviezo, M. 2014. Parametricismo digital: proceso de diseño y construcción arquitectónica. Aplicación: estudiantes de diseño de la titulación de arquitectura de la UTPL. Tesis pregrado. Loja, Ecuador, Universidad Técnica Particular de Loja. 168 p.
- Victoria, M. 2006. Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos. Tesis pregrado, México, Universidad Nacional Autónoma de México. 263 p.
- Westarco.s.f. Manual de Soldadura. Bogotá, Colombia. 210 p.

ANEXOS

ANEXO 01: Cálculo de las propiedades de las nuevas secciones circulares, las cuáles fueron tomadas de las secciones transversales huecas de aceros Arequipa y Miromina.

Øe (mm)	t (mm)	Ze (cm)	A (cm ²)	Ay (cm ²)	Az (cm ²)	Iy=Iz (cm ⁴)	Wy=Wz (cm ³)	Wply=Wplz (cm ³)	iy=iz (cm)	It(cm ⁴)	Wt (cm ³)	Alpha- y	Alpha- z	Alpha- LT	Producto
26.7	1.8	1.335	1.41	0.90	0.90	1.10	0.82	1.12	0.88	2.19	1.64	0.21	0.21	0.76	1.00
26.7	2.5	1.335	1.90	1.21	1.21	1.41	1.05	1.47	0.86	2.81	2.11	0.21	0.21	0.76	1
42.2	1.8	2.11	2.28	1.45	1.45	4.67	2.21	2.94	1.43	9.34	4.43	0.21	0.21	0.76	1.00
33.4	3	1.67	2.87	1.82	1.82	3.34	2.00	2.78	1.08	6.68	4.00	0.21	0.21	0.76	1.00
60.3	1.8	3.015	3.31	2.11	2.11	14.16	4.70	6.16	2.07	28.33	9.40	0.21	0.21	0.76	1.00
42.2	3	2.11	3.69	2.35	2.35	7.14	3.38	4.62	1.39	14.28	6.77	0.21	0.21	0.76	1.00

Leyenda:

	Aceros Arequipa
	Aceros Miromina

ANEXO 02: Creación del archivo csv con las nuevas secciones circulares.

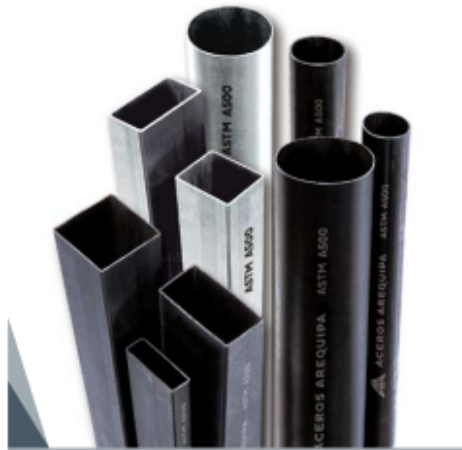
country	family	name	shape	h mm	t_web mm	z_s cm	A cm ²	A _y cm ²	A _z cm ²	I _y cm ⁴	I _z cm ⁴	W _y cm ³	W _z cm ³	W _{plz} cm ³	i _z cm	I _t cm ⁴	W _t cm ³	C _w cm ⁶	
PERU	HSRO	HSS26.7X1.8	O	26.7	1.8	1.335	1.41	0.9	0.9	1.1	0.82	1.12	0.88	1.1	0.82	1.12	0.88	2.19	1.64
PERU	HSRO	HSS26.7X2.5	O	26.7	2.5	1.335	1.9	1.21	1.21	1.41	1.05	1.47	0.86	1.41	1.05	1.47	0.86	2.81	2.11
PERU	HSRO	HSS42.2X1.8	O	42.2	1.8	2.11	2.28	1.45	1.45	4.67	2.21	2.94	1.43	4.67	2.21	2.94	1.43	9.34	4.43
PERU	HSRO	HSS33.4X3.0	O	33.4	3	1.67	2.87	1.82	1.82	3.34	2	2.78	1.08	3.34	2	2.78	1.08	6.68	4
PERU	HSRO	HSS60.3X1.8	O	60.3	1.8	3.015	3.31	2.11	2.11	14.16	4.7	6.16	2.07	14.16	4.7	6.16	2.07	28.33	9.4
PERU	HSRO	HSS42.2X3.0	O	42.2	3	2.11	3.69	2.35	2.35	7.14	3.38	4.62	1.39	7.14	3.38	4.62	1.39	14.28	6.77
US	HSRO	HSS42.2X3.6	O	42.2	3.56	2.11	4.03	2.57	2.57	7.66	3.64	5	1.38	7.66	3.64	5	1.38	15.3	7.25
US	HSRO	HSS48.3X3.0	O	48.3	3.05	2.415	4.03	2.57	2.57	10.4	4.33	5.83	1.61	10.4	4.33	5.83	1.61	20.9	8.65
US	HSRO	HSS48.3X3.7	O	48.3	3.68	2.415	4.83	3.07	3.07	12.2	5.06	6.9	1.59	12.2	5.06	6.9	1.59	24.4	10.1
US	HSRO	HSS48.3X4.8	O	48.3	4.78	2.415	6.08	3.87	3.87	14.8	6.13	8.52	1.56	14.8	6.13	8.52	1.56	29.6	12.26
US	HSRO	HSS60.3X3.2	O	60.3	3.18	3.015	5.31	3.38	3.38	21.9	7.26	9.7	2.03	21.9	7.26	9.7	2.03	43.7	14.49
US	HSRO	HSS60.3X3.9	O	60.3	3.91	3.015	6.45	4.11	4.11	26.1	8.65	11.7	2.01	26.1	8.65	11.7	2.01	52	17.25
US	HSRO	HSS60.3X4.8	O	60.3	4.78	3.015	7.74	4.93	4.93	30.5	10.1	13.8	1.98	30.5	10.1	13.8	1.98	61.2	20.3
US	HSRO	HSS60.3X5.5	O	60.3	5.54	3.015	8.97	5.71	5.71	34.3	11.4	15.7	1.96	34.3	11.4	15.7	1.96	68.7	22.79

ANEXO 03: Catálogo de propiedades del tubo ASTM A500 de sección circular de aceros Arequipa.

Los Tubos Aceros Arequipa son los únicos que poseen un acabado perfecto, limpio de rebordes y costura uniforme. No tienen abolladuras en los extremos, lo que permite aprovechar todo el tubo. Libres de óxido y corrosión.

Contamos con una gama completa de medidas y acabados para todos los usos. Se abastecen largos especiales a pedido.

Tubo LAC ASTM A500



		DESIGNACIONES Y PESOS NOMINALES en Kg/m									
Forma	Designación Nominal pulgadas	Dimensión exterior (mm)	Espesores (mm)								
			1.5	1.8	2	2.5	3	4		4.5	6
REDONDO DIAM. NOMINAL	1/2	21.3		0.866	0.952	1.159					
	3/4	26.7		1.105	1.218	1.492					
	1	33.4		1.403	1.549	1.905	2.249				
	1 1/4	42.2		1.793	1.983	2.448	2.900				
	1 1/2	48.3		2.064	2.284	2.824	3.351				
	2	60.3		2.597	2.876	3.564	4.239				
	2 1/2	73.0			3.502	4.347	5.179				
	3	88.9			4.285	5.327	6.355				
	4	114.3			5.539	6.892	8.234				
	CUADRADO L.E.	-	25x25	1.061		1.460					
-		30x30	1.300		1.700						
-		40x40	1.770		2.244		3.320				
-		50x50	2.250		3.122	3.872	4.316				
2		50.8			3.122	3.872	4.316				
-		75x75			4.500	5.560	6.810				
RECTANGULAR L.E.	4	101.6					9.174	12.133	13.594		
	-	100x100			6.165	7.675	9.174	12.133	13.594	16.980	
	-	20x40	1.354		1.700						
	-	25x50	1.650		2.261						
	-	40x60	2.260		3.033	3.600	4.250				
	-	40x80	2.710		3.660	4.390	5.190				
	-	50x75					5.423				
	-	50x100			4.500	5.560	6.600	8.590			
-	50x150			6.165	7.676	9.174	11.730				

■ Negro y Galvanizado

NORMAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN:

Las dimensiones, pesos y espesores se fabrican según la Norma ASTM A500.

DESCRIPCIÓN:

Tubo fabricado con acero al carbono laminado en caliente (LAC), utilizando el sistema de soldadura por resistencia eléctrica por inducción de alta frecuencia longitudinal (ERW).

Las secciones de fabricación son redondas, cuadradas y rectangulares.

PRESENTACIÓN:

Longitud

Redondos	:	6.40 y 6 m.
Cuadrados	:	6 m.
Rectangulares	:	6 m.

Otras longitudes a pedido.

Acabado de extremos: Refrentado (plano), limpio de rebordes,
Recubrimiento : Negro Galvanizado (mínimo 120 gr / m²)

USOS:

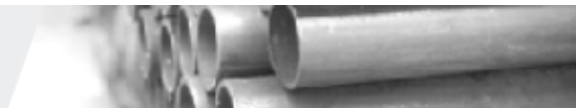
Estructuras livianas y pesadas diversas, tijerales, postes, cercos perimétricos, carrocerías, etc.

PROPIEDADES MECÁNICAS:

Redondo:	Grado A	Grado B
Resistencia a la Tracción (Mpa)	310	400
Límite de Fluencia (Mpa)	230	290
Cuadrado y Rectangular:	Grado A	Grado B
Resistencia a la Tracción mín. (Mpa)	310	400
Límite de Fluencia mín. (Mpa)	270	315

ANEXO 04: Catálogo de propiedades del tubo ASTM A500 de sección circular de aceros Miromina.

ASTM A500



> CARACTERÍSTICAS:

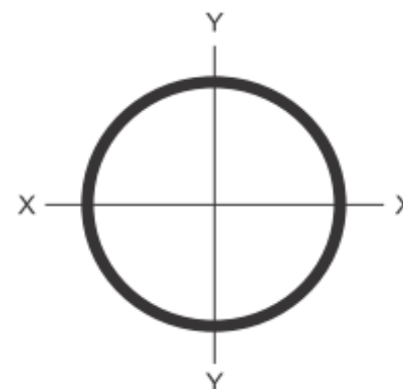
Son tubos fabricados a partir de planchas laminadas en caliente bajo Norma ASTM A500 Grado A y Grado B. En diversos espesores de pared. Son fabricados por soldadura bajo resistencia eléctrica por inducción de alta frecuencia (ERW).

> PRESENTACIÓN:

Se suministran en longitudes de 6m., con extremos limpios de rebordes y con recubrimiento negro

> USO:

Estructuras metálicas livianas y de gran resistencia, columnas, vigas, tijerales, carrocerías, etc.



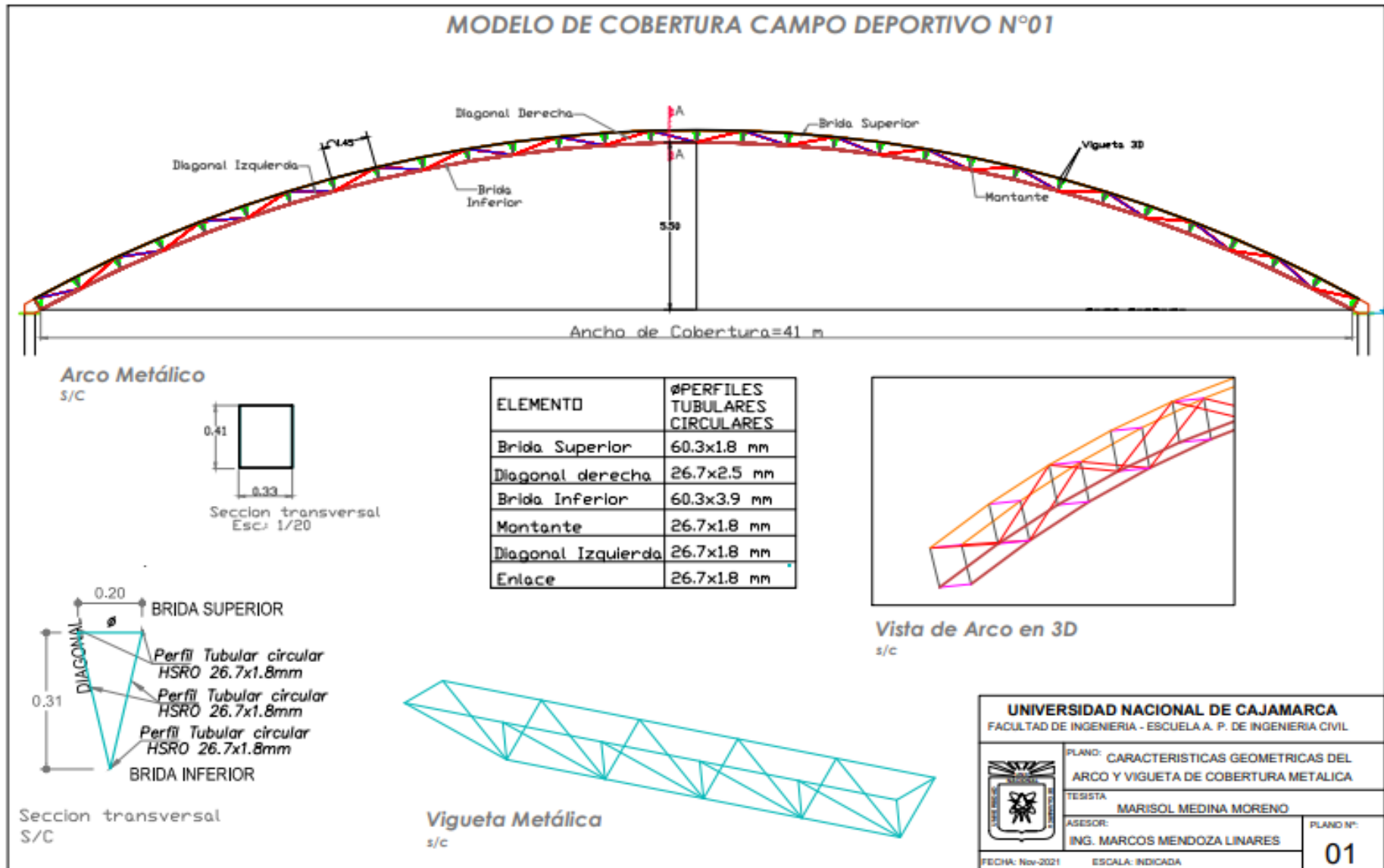
PROPIEDADES MECÁNICAS	GRADO A	GRADO B
Límite de Fluencia mín. (MPa)	230	290
Resistencia a la Tracción mín. (MPa)	310	400
Alargamiento mín. en 50 mm	25 %	23 %

COMPOSICIÓN QUÍMICA	EN CUCHARA	PRODUCTO
Carbono (%)	0.260	0.300
Silicio (%)	1.350	1.400

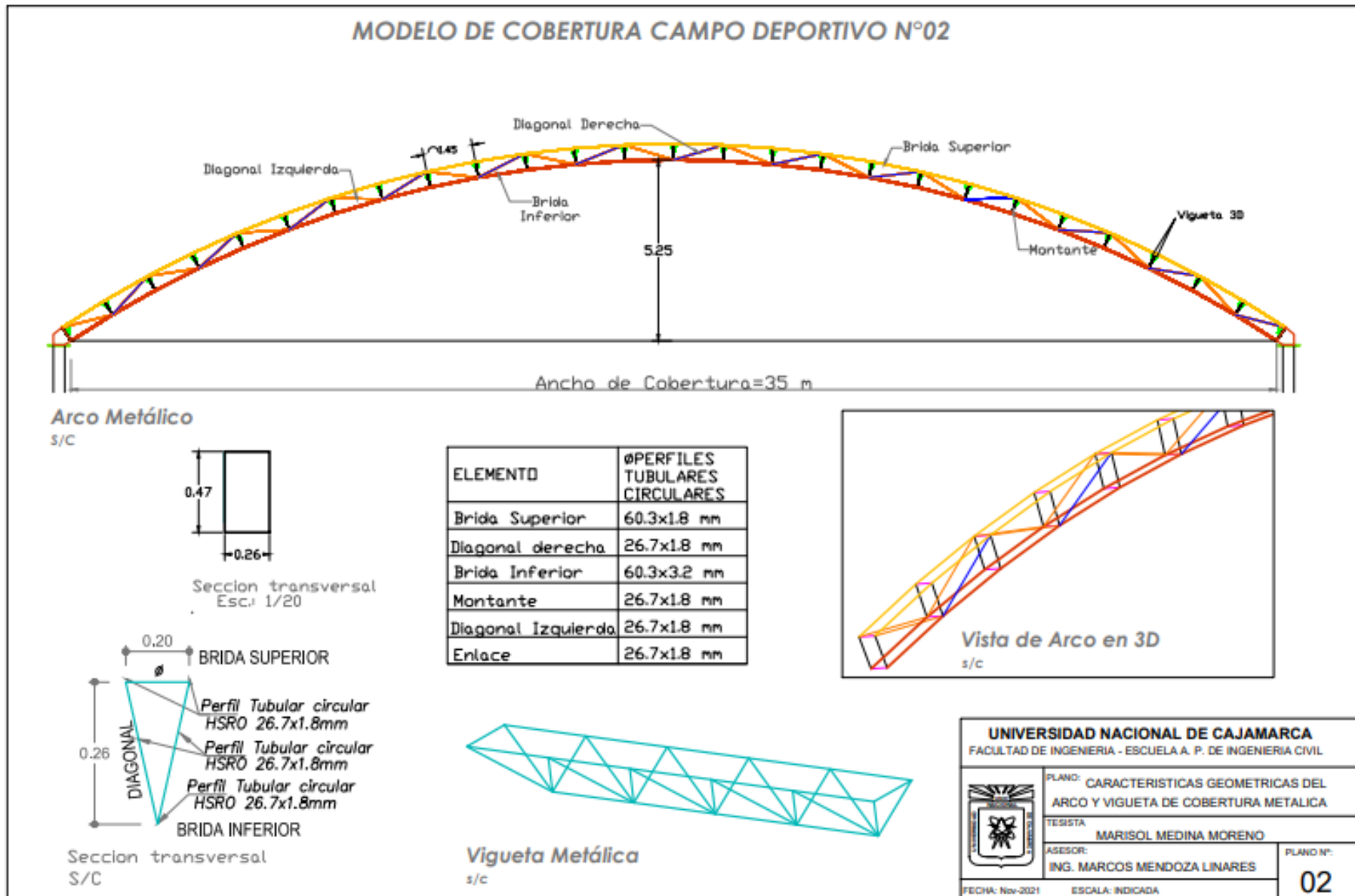
DIÁMETRO NOMINAL (plg)	DIÁMETRO EXTERIOR (mm)	ESPESOR DE PARED (mm)	PESO (kg/m)
1/2"	21.3	1.8	0.866
1/2"	21.3	2.0	0.952
1/2"	21.3	2.5	1.159
3/4"	26.7	1.8	1.105
3/4"	26.7	2.0	1.218
1"	33.4	1.8	1.403
1"	33.4	2.0	1.549
1"	33.4	3.0	2.249
1 1/4"	42.2	1.8	1.793

19

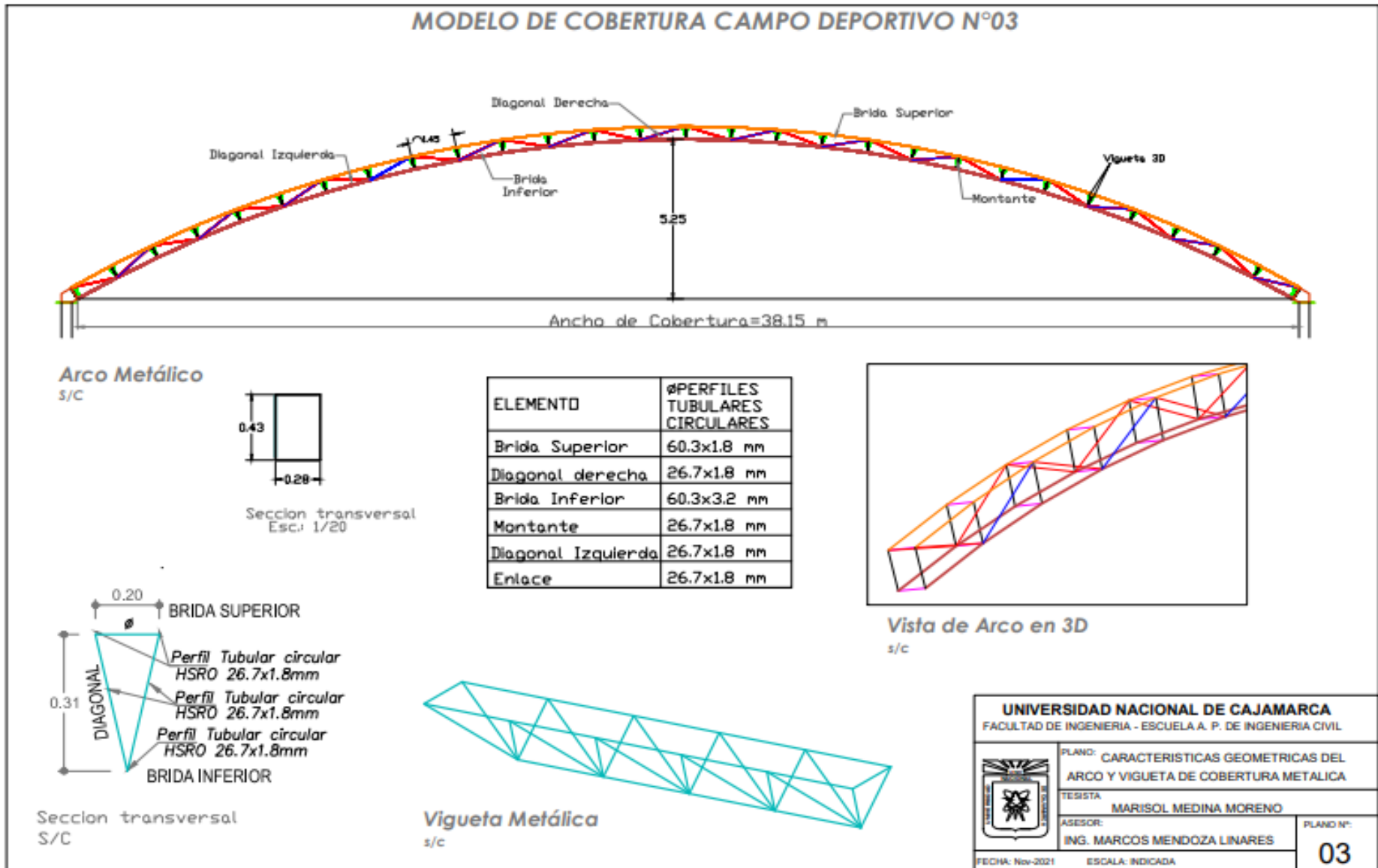
ANEXO 05: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 01.



ANEXO 06: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 02.



ANEXO 07: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 03.



ANEXO 08: Plano de características geométricas del arco y vigueta de cobertura metálica optimizada para el campo deportivo N° 04

