

Universidad Latina de Costa Rica
Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Información
Escuela de Ingeniería Civil

Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega.

Trabajo final de graduación para optar por el grado académico de Licenciada en Ingeniería Civil

Sustentante:

Lady Godínez Fernández

San José, Costa Rica

Enero de 2022

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: *Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega*, por la estudiante: Lady Godínez Fernández, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede San Pedro, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

Gerardo Enrique Chacón Rojas
Tutor

Rónald Eugenio Jiménez Castro
Lector

Luis Alejandro Carvajal Soto
Representante



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL TUTOR
DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

San Pedro, 21 de diciembre de 2021.

Señores
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: *Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega*, elaborado por la estudiante: Lady Godínez Fernández como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

GERARDO
ENRIQUE
CHACON
ROJAS (FIRMA)

Firmado
digitalmente por
GERARDO ENRIQUE
CHACON ROJAS
(FIRMA)
Fecha: 2021.12.21
07:57:45 -06'00'

Gerardo Enrique Chacón Rojas



CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

San Pedro, 21 de diciembre de 2021.

Señores

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: *Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega*, elaborado por la estudiante: Lady Godínez Fernández como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

RONALD EUGENIO JIMENEZ CASTRO (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-0945-0462.
Fecha declarada: 21/12/2021 09:02:38 AM
Esta representación visual no es fuente
de confianza. Valide siempre la firma.

Rónald Eugenio Jiménez Castro



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR
DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

San Pedro, 21 de diciembre de 2021.

Señores

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: *Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega*, elaborado por la estudiante: Lady Godínez Fernández como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

LUIS
ALEJANDRO
CARVAJAL
SOTO (FIRMA)

Firmado digitalmente
por LUIS ALEJANDRO
CARVAJAL SOTO
(FIRMA)
Fecha: 2021.12.21
07:59:34 -06'00'

Luis Alejandro Carvajal S

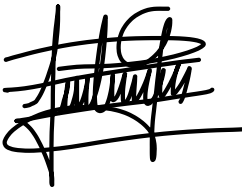
DECLARACIÓN JURADA

Yo, Lady Godínez Fernández estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual de la tesis titulada:

Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Quepos, 21 de diciembre de 2021.



Lady Godínez Fernández

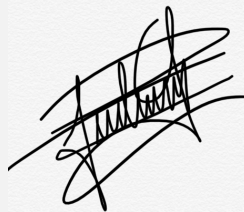
Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)
Universidad Latina de Costa Rica

Yo (Nosotros):	Lady Godínez Fernández
De la Carrera / Programa:	Ingeniería Civil
Modalidad de TFG:	Tesis
Titulado:	Diseño comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero para uso de bodega.

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “**AUTOR**”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “**OBRA**”). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “**UNIVERSIDAD**”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD** **SEXTO:** La presente autorización y cesión se registrará por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO**: El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD.**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD.** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO**: El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO**: El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 18 de 12 de 2021 a las 3pm

Firma del estudiante(s):



Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por darme las fuerzas y la capacidad de poder enfrentar y concluir esta etapa de mi vida.

En según lugar, agradezco a mis hijas y a mi esposo por su paciencia, ayuda y apoyo durante todo este proceso, como también a mis padres por tenerme siempre presentes en sus oraciones durante toda la carrera universitaria y principalmente en esta etapa final. Agradezco a mi hermana quien siempre me impulso y me guio durante este proceso.

Agradezco al Ingeniero José Agüero quien me brindo su apoyo y colaboración durante este proceso, también mil gracias a mi compañero Josué Cascante con quien siempre tuve su apoyo tanto en este proceso como durante el proceso de formación en la universidad como Ingenieros.

Sin olvidar a mi tutor, el Ingeniero Gerardo Chacón al cual agradezco enormemente por darme su confianza, apoyo y orientación durante todo el proceso de esta investigación.

Finalmente, agradezco de todo corazón a todos aquellos que de una u otra manera formaron parte durante mi proceso de formación universitaria como Ingeniera e hicieron que este logro fuese posible.

Dedicatoria

A Dios.

A mis hijas.

A mis padres.

A mis sobrinos.

Resumen

El presente estudio, analiza el comportamiento estructural de dos tipos de materiales, acero y aluminio. Se diseñan cerchas para varios claros que van desde los 10 hasta los 25 metros, se ha considerado en el diseño las cargas de viento de acuerdo a la nueva normativa “Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021” y se plantea analizar el diseño para la zona de la gran área metropolitana. Para la estructura de techo en acero se propone realizar las conexiones mediante la técnica de soldadura y para la estructura en aluminio se formula diseñar las conexiones empernadas, la decisión se basa en aplicar las principales prácticas constructivas de estos materiales. El diseño de la estructura en aluminio se realiza basado en la norma del Manual de Diseño de Aluminio, mientras que la del acero se basa en la normativa Specification for Structural Steel Buildings, AISC 360-16. Se utiliza el software SAP2000 para realizar el análisis y diseño, y mediante el asistente matemático Excel se verifican los resultados. Una vez realizado los diseños ante igual condiciones de carga e igual configuración de la estructura, se extraen los resultados para analizarlos.

Los resultados demuestran que actualmente no hay suficiente perfilera en aluminio en el país para realizar diseños optimizados cuando los parametros de luz van desde los 10 a 25 metros, por otra parte se demuestra que las deflexiones presentes en el diseño de aluminio por lo general son el doble que las obtenidas en el diseño en acero, sin embargo no son limitantes del diseño. Además, de manera indirecta se compara la viabilidad económica de las estructuras en aluminio y en acero a corto, mediano y largo plazo, donde se dice que a corto plazo el acero es mejor, mientras que a mediano plazo sus valores se equiparan e indiscutiblemente a largo plazo el aluminio es la mejor elección desde el punto de vista económico, asumiendo un debido mantenimiento en las estructuras de acero. Se aclara que esta viabilidad económica esta sujeta a cambios dado a que existen variantes que podrían afectar los resultados en el futuro.

Palabras clave: aluminio, conexin, aleación, temple, extrusión, módulo elástico, deflexiones.

Abstract

The present study analyzes the structural behavior of two types of materials, steel and aluminum. Trusses are designed for various spans ranging from 10 to 25 meters, wind loads were considered in the design according to the new regulation "Technical guidelines for the calculation and application of wind forces in design and construction of buildings in Costa Rica, 2021" wind loads for the Great Metropolitan area were used in the study. For the steel roof structure, connections by welding technique were used and for the aluminum structure it is formulated to use the bolted connections, the decision is based on the standard construction practices of these materials. The design of the aluminum structure is based on the standard of the Aluminum Design Manual, while that of the steel is based on the standard Specification for Structural Steel Buildings, AISC 360-16. The SAP2000 software is used to perform the analysis and design and the results are verified using the Excel mathematical aid. Once the designs have been made under the same load conditions and the same configuration of the structure, the results are extracted for analysis.

The results show that currently there is not enough aluminum profiles in the country to perform optimized designs when the spans range from 10 to 25 meters, on the other hand it is shown that the deflections present in the aluminum design are generally double than those obtained in the steel design, however they are not limiting of the design. In addition, indirectly, the economic viability of aluminum and steel structures is compared in the short, medium and long term, where it is said that in the short-term steel is better, while in the medium term its values are unquestionably equal in the long term. term, aluminum is the best choice from an economic point of view, assuming due maintenance in steel structures. It is clarified that this economic viability is subject to change giving that there are variants that could affect the results in the future.

Keywords: aluminum, connection, alloy, tempering, extrusion, elastic modulus, deflections.

Tabla de Contenidos

CAPÍTULO I	1
Problema y Propósito	2
1. Estado actual del objeto de estudio	2
2. Planteamiento del problema de estudio	6
2.1. Enunciado del problema	6
2.2. Formulación del problema.....	6
3. Justificación	6
4. Objetivos.....	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos.....	7
5. Alcances y limitaciones	8
5.1. Alcances	8
5.2. Limitaciones.....	9
6. Delimitaciones	9
6.1. Delimitación espacial	9
6.2. Delimitación temporal.....	10
CAPÍTULO II.....	11
Fundamentación Teórica.....	12
1. Aluminio	12
2. Aleaciones.....	13
2.1. Aleaciones forjadas	13
2.2. Aleaciones moldeadas	18
3. Temple	19
3.1. Tratamiento térmico	19
3.2. Endurecimiento por deformación	20
3.3. Clasificación de temple.....	20

4. Comparación del aluminio contra el acero	22
5. Normas para el diseño estructural.....	23
5.1. Normas nacionales	23
5.2. Normas internacionales	23
6. Métodos de diseño	24
6.1. Método de diseño por esfuerzos admisibles (ASD).....	24
6.2. Método de diseño por factor de carga y resistencia (LRFD).....	24
7. Factores de seguridad.....	25
8. Diseño estructural para aluminio	26
8.1. Resistencia nominal a tensión.....	27
8.2. Resistencia nominal a compresión.....	27
8.3. Resistencia nominal a flexión.....	32
8.4. Resistencia nominal a cortante	36
9. Diseño de conexiones	36
9.1. Agujeros.....	38
9.2. Separación entre pernos y distancia a bordes.....	38
9.3. Tipos de pernos y material	38
9.4. Conexiones empernadas	39
9.5. Estados límites en el elemento para el diseño de la conexión	40
9.6. Resistencia nominal para pernos de aluminio.....	40
10. Deflexiones permisibles.....	41
11. Diseño por viento.....	42
11.1. Presión básica del viento	42
11.2. Presión de viento	42
11.3. Acciones de viento	44
12. Combinación de cargas.....	48
CAPÍTULO III	49
Marco Metodológico.....	50
1. Definición del enfoque y método de investigación.....	50

1.1. Enfoque de la investigación.....	50
1.2. Método de investigación.....	50
2. Fuentes de Información.....	51
3. Definición de variables	51
4. Instrumentos y técnicas utilizadas en la recolección de los datos	53
5. Sustentación de la confiabilidad y validez de los instrumentos de la investigación.....	55
CAPÍTULO IV	56
Análisis de los datos	57
1. Datos para el diseño	58
1.1. Geometría y tamaño	58
1.2. Cargas	58
2. Resultados obtenidos	74
2.1. Análisis estructural	77
2.2. Análisis de demanda capacidad para las estructuras propuestas	82
2.3. Diseño de conexiones	89
2.4. Deflexiones	102
2.5. Valoración de costos por peso	107
2.6. Valoración de costos por mantenimiento.....	113
CAPÍTULO V.....	119
Conclusiones y Recomendaciones	120
Conclusiones.....	120
Recomendaciones	122
Referencias	123
ANEXO 1	125
ANEXO 2	137

Índice de Tablas

Tabla 1. Factores de seguridad para métodos de diseño ASD y LRFD-----	25
Tabla 2. Matriz de variables -----	52
Tabla 3. Datos de perfiles de aluminio para diseño -----	77
Tabla 4. Propiedades mecánicas de la Aleación 6063-T6 -----	78
Tabla 5. Resistencia de diseño para perfil 1 -----	79
Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero ASTM A653 -----	81
Tabla 7. Datos de perfiles en acero para diseño-----	81
Tabla 8. Resistencia de diseño para perfiles en acero -----	81
Tabla 9. Valores de demanda capacidad para techo #1 -----	86
Tabla 10. Valores de demanda capacidad para techo #2-----	86
Tabla 11. Valores de demanda capacidad para techo #3-----	87
Tabla 12. Valores de demanda capacidad para techo #4-----	88
Tabla 13. Características geométricas de los perfiles utilizados en el diseño de acero -----	89
Tabla 14. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #1 en acero -----	108
Tabla 15. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #1 en aluminio -----	108
Tabla 16. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #2 en acero -----	109
Tabla 17. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #2 en aluminio -----	110
Tabla 18. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #3 en acero-----	110

Tabla 19. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #3 en aluminio -----	111
Tabla 20. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #4 en acero -----	111
Tabla 21. Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #4 en aluminio -----	112
Tabla 22. Peso de las estructuras-----	112

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema del proceso de extrusión para piezas de aluminio	14
Figura 2. Esquema del proceso de laminación en caliente para piezas de aluminio	15
Figura 3. Propiedades generales del aluminio	26
Figura 4. Constante de Pospandeo.....	35
Figura 5. Comportamiento del aluminio ante la variación de la temperatura.....	37
Figura 6. Límites de deflexión.....	41
Figura 7. Coeficientes de direccionalidad.....	44
Figura 8. Coeficientes de presión interna para techos y paredes	45
Figura 9. Coeficientes de presión externa, C_p para muros.....	45
Figura 10. Coeficientes de presión externa, C_p para techos	46
Figura 11. Diagrama de flujo para el trabajo de investigación	54
Figura 12. Datos para el cálculo de fuerzas de diseño por viento sobre la estructura	60
Figura 13. Cargas de diseño para techo #1- Sentido Transversal	60
Figura 14. Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido transversal ($-GC_{pi}$).....	61
Figura 15. Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido transversal ($+GC_{pi}$)	62
Figura 16. Cargas de diseño para techo #1- Sentido Longitudinal	63
Figura 17. Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido longitudinal ($-GC_{pi}$)..	64
Figura 18. Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido longitudinal ($-GC_{pi}$)..	65

Figura 19. Cargas de diseño para techo #2, #3 y #4 - Sentido Transversal.....	66
Figura 20. Cargas de viento para la estructura de techo #2 en el sentido transversal (-GCpi)....	67
Figura 21. Cargas de viento para la estructura de techo #4 en el sentido transversal (+GCpi) ...	68
Figura 22. Cargas de diseño para techo #2, #3 y #4 - Sentido Longitudinal.....	69
Figura 23. Cargas de viento para la estructura de techo #3 en el sentido longitudinal (+GCpi) .	70
Figura 24. Cargas de viento para la estructura de techo #4 en el sentido longitudinal (+GCpi) .	71
Figura 25. Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #1- Sentido Transversal .	72
Figura 26. Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #1- Sentido Longitudinal	72
Figura 27. Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #2, #3 y #4 - Sentido Transversal.....	73
Figura 28. Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #2, #3 y #4 - Sentido Longitudinal.....	73
Figura 29. Puente en aluminio construido por Poralu Marine, Ajaccio	75
Figura 30. Estructura en aluminio unida mediante conexiones mecánicas	76
Figura 31. Geometría de diseño para estructura de cercha del techo #1	77
Figura 32. Demanda capacidad de elementos en la cuerda superior de la cercha	78
Figura 33. Longitud máxima del perfil y carga ultima de diseño para techo #1	79
Figura 34. Valores de diseño determinados por SAP2000 para la estructura de techo #1 en aluminio.	80

Figura 35. Valores de diseño determinados por SAP2000 para la estructura de techo #1 en acero.	82
Figura 36. Normativa para el cálculo de demanda capacidad en acero.	84
Figura 37. Valores de demanda capacidad para el techo#1 en acero	85
Figura 38. Conexiones en cercha de techo #1	90
Figura 39. Conexión 1 en cercha de estructura de Techo #1	91
Figura 40. Resistencia de diseño en pernos 3/8	92
Figura 41. Datos del perfil 1 de aluminio	92
Figura 42. Estado límite de diseño para el perfil 1	93
Figura 43. Datos de la placa 5 mm	93
Figura 44. Resistencia a compresión en la placa 5 mm	94
Figura 45. Estado límite de diseño en la placa 5mm.	94
Figura 46. Conexión 2 en cercha de estructura de Techo #1	95
Figura 47. Datos de diseño para conexión 1 y 2 del techo#1	96
Figura 48. Conexiones en cercha #4	96
Figura 49. Conexión 1 en cercha de estructura de Techo #4	97
Figura 50. Resistencia de diseño en pernos $\frac{3}{4}$	98
Figura 51. Datos del perfil 2 de aluminio	98
Figura 52. Estado límite de diseño para el perfil 2	99

Figura 53. Datos de la placa 6 mm	99
Figura 54. Resistencia a compresión en la placa 6 mm	99
Figura 55. Estado límite de diseño en la placa 6mm	100
Figura 56. Conexión 2 en cercha de estructura de Techo #4	101
Figura 57. Datos de diseño para conexión 1 y 2 del techo#4	101
Figura 58. Deflexión máxima en cercha de acero - Techo #1	103
Figura 59. Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #1.....	103
Figura 60. Deflexión máxima en cercha de acero- Techo #2	103
Figura 61. Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #2.....	104
Figura 62. Deflexión máxima en cercha de acero- Techo #3	104
Figura 63. Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #3.....	104
Figura 64. Deflexión máxima en cercha de acero- Techo #4	105
Figura 65. Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #4.....	105
Figura 66. Deflexiones en las estructuras de acero y aluminio	106
Figura 67. Gráfico comparativo del costo del acero vs. el aluminio a través del tiempo.....	115
Figura 68. Comparación de las estructuras por peso total	116
Figura 69. Deflexiones en las estructuras para el caso más crítico del análisis.....	117
Figura 70. Demanda-Capacidad en cuerda superior	117
Figura 71. Demanda-Capacidad en cuerda inferior	118

Figura 72. Demanda-Capacidad en arriostres 118

CAPÍTULO I

Problema y Propósito

1. Estado actual del objeto de estudio

Los siguientes estudios previos corresponden a aportes realizados al campo del aluminio, siendo insumos sumamente relevantes para esta investigación.

(The Aluminum Association, 2020), ha creado un manual para el diseño de estructuras en aluminio, este documento es actualizado cada cinco años, la versión más reciente es el “*Manual de diseño de aluminio-2020*”. Contiene tanto especificaciones para el diseño de estructuras en aluminio como para miembros y conexiones.

(European Aluminium, 2020), involucrado en promover el uso del aluminio como un material de uso estructural por sus propiedades permanentes, en una publicación llamada “*Diseño de estructuras de aluminio Introducción al Eurocódigo 9 con ejemplos resueltos*” presenta información básica de los siguientes temas: 1) Las razones para utilizar el aluminio con fines estructurales, 2) La descripción de las principales aleaciones de aluminio disponibles para uso estructural, 3) El diseño de juntas, 4) Ejemplos resueltos sobre la aplicación del Eurocódigo 9 y 5) Sostenibilidad del aluminio. Esta publicación destaca las principales características del aluminio como material de construcción que lo hacen ser un posible competidor con respecto al acero, una de ellas es su ligereza dado a que principalmente facilita y simplifica las labores de montaje de las estructuras, otro aspecto favorable es que su peso reduce las cargas muertas que aportan las estructuras en los diseños, disminuyendo los costos en la construcción de los cimientos. Además, European Aluminium recalca que el aluminio genera de forma natural, una capa de óxido en la superficie que lo protege de la corrosión, este beneficio toma ventaja con respecto al acero, debido a que su mantenimiento es muy bajo o casi nulo, utilizado sobre todo en estructuras donde las condiciones climáticas son abrasivas.

(Computers and Structures, 1978-2021), fue fundada en Berkeley en 1975, cuyo fundador y presidente es Ashraf Habibullah, esta compañía ha creado una serie de software para el análisis y diseño estructural entre ellos SAP2000, este software es actualizado año tras año, en una de sus últimas versiones trae integrado un módulo de diseño en aluminio

basado en la normativa del Manual de Diseño de Aluminio, la última versión posee el “*Manual de diseño de marcos de aluminio, 2020*”.

(Marmolejo Castro, 2014), en su trabajo final de graduación creó un “*Manual para el diseño de estructuras de aluminio*”, tomando como referencias lo dispuesto en el Manual de Diseño de Aluminio 2005 y en el Euro código 09, con el fin de proporcionar la información necesaria para el análisis y diseño de elementos sometidos a tensión, compresión, flexión, cortante y sus combinaciones, además dispone de un capítulo dedicado al análisis y diseño de conexiones en aluminio, tanto mecánicas como soldadas.

(Paredes Terán y Sánchez Caiza, 2014), para obtener su título de ingenieros mecánicos realizaron un trabajo de investigación llamado “*Diseño y comparación de una estructura de acero vs. una estructura de aluminio para una cubierta de 19.5 m de luz y 6 m de ancho a una altura de 12.3 m con dos apoyos posteriores*” con fin de comparar el comportamiento de una estructura bajo cargas similares, pero con materiales diferentes. Los autores determinan en cuanto al pre dimensionamiento que el criterio predominante fue el de las deflexiones en especial porque el aluminio tiene un módulo elástico menor que el del acero. También concluyen que la opción económicamente más viable es la construcción en material de acero, mientras no se trate de una industria que utilice materiales agresivos o altamente inflamables. Los escritores recomiendan considerar la utilización del aluminio en estructuras con menores luces, obteniendo estructuras con mayor factibilidad desde el punto de vista técnico y económico que estructuras de acero.

(Comité Europeo de Normalización [CEN], 2007), ha redactado una serie de Eurocódigos estructurales, que consisten en un conjunto de normas y métodos para el cálculo de la resistencia mecánica de los elementos usados estructuralmente en la construcción, uno de los más recientemente es el “*Eurocódigo 9*”, creado especialmente para el diseño de estructuras en aluminio, está conformado por las siguientes 5 partes: a) EN1999-1-1. Reglas generales y reglas para la edificación, b) EN1999-1-2. Reglas para el proyecto de estructuras de aluminio frente al fuego, c) EN1999-1-3. Resistencia a fatiga de las estructuras de aluminio, c) EN1999-1-4. Chapas de espesor reducido, d) EN1999-1-5. Estructuras laminares.

(Kinssell y Ferry, 2002), este libro titulado “*Estructuras de Aluminio, una guía para su especificación y diseño*” basado en el Manual de Diseño de Aluminio, contiene información importante del aluminio, como los métodos de fabricación, sus principales propiedades para el diseño, las especificaciones para el diseño de estructuras de aluminio, así como también para conexiones; este libro ha sido utilizado como referencia relevante para otras investigaciones previas sobre el aluminio.

(Dyvik et al., 2019), el propósito de este artículo “*Aluminio estructural en la arquitectura -La historia y el futuro del aluminio como material estructural*” es proveer tanto antecedentes como propiedades estructurales sobre el aluminio y sus aplicaciones. En el cual se menciona como el aluminio fue evolucionando al pasar de los años en todas las industrias y gracias a sus principales propiedades como su resistencia a la corrosión y bajo peso, lo han llevado a ser usado ampliamente tanto en la industria aeroespacial, automovilística, aeronáutica, así como también en la industria de la construcción (puentes, torres, pasarelas, casas y entre otras). Sin olvidar otras características como un aspecto hermoso, la trabajabilidad y la durabilidad.

(Pridybailo et al., 2011), en esta investigación titulada “*Estudio de corrosividad atmosférica en el Volcán Turrialba*”, narra la actividad donde se colocaron probetas acero, cobre, aluminio y acero galvanizado a la intemperie en las cercanías de volcán Turrialba, con el fin de medir el comportamiento de los materiales ante condiciones climáticas severas. Los resultados demostraron que el material más resistente ante condiciones climáticas severas es el aluminio, seguido por el acero galvanizado, más sin embargo el aluminio presentó un leve deterioro, poco visible, donde se logra observar pequeñas picaduras sobre la superficie, la investigación demuestra que la velocidad de oxidación en el aluminio es muy lenta en comparación con los otros materiales. Los investigadores recomiendan, que, para el uso del aluminio en el exterior, lo ideal es usar aluminio anodizado, debido a que posee un recubrimiento especial que disminuye aún más su deterioro, para el caso de materiales de acero galvanizado se recomienda realizar un recubrimiento con pinturas especiales que lo protejan de la oxidación, como también, utilizar buenas técnicas de aplicación para evitar así capas delgadas que permitan la pronta oxidación. Y por último el estudio recomienda considerar las condiciones climáticas de un país tropical húmedo, como lo es nuestra Costa

Rica, recordando que la humedad relativa y la temperatura están siempre presentes y son factores que influyen negativamente en el proceso de oxidación.

(GAIKER-IK4, 2016), tras un estudio realizado por el Centro Tecnológico GAIKER-IK4 a petición de Asociación Española del Aluminio (AEA), con el fin de medir las emisiones de humo y gases tóxicos que puedan generar algunos materiales de construcción al ser expuestos al fuego, fueron sometidos a ensayo probetas de madera, aluminio y PVC, todas las muestras fueron sometidos a condiciones iguales para obtener resultados comparables. Tras los ensayos realizados el aluminio no presentó emisión de humo ni sustancias tóxicas, la madera emanó sustancias de metano, etanol, entre otras, el PVC derivó sustancias de dióxido de azufre, etano, etileno, entre otras. El estudio se realizó para comprobar el cumplimiento de los materiales con las exigencias del Código Técnico de la Edificación CTE, en la búsqueda de elevar la seguridad en los materiales de la construcción, por lo tanto, se concluye que el aluminio es un material seguro ante una posible eventualidad de un incendio.

2. Planteamiento del problema de estudio

2.1. *Enunciado del problema*

De acuerdo a lo consultado a diferentes empresas constructoras de nuestro país, el material más común para la construcción de estructuras de techos es el acero, por ser un material que provee seguridad y rapidez en los procesos constructivos. Sin embargo, se posee la opción de realizar este tipo de estructuras con otro material como lo es el aluminio, cuyas propiedades son similares a las del acero; pero no se ha demostrado de manera comparativa la viabilidad de cada uno de estos materiales, según diseño, costo y mantenimiento a largo plazo.

2.2. *Formulación del problema*

A la luz del detalle brindado acerca del enunciado del problema y con referencia a las investigaciones realizadas previamente, el presente trabajo pretende responder la siguiente pregunta:

¿Cuáles serán esas diferencias y similitudes a nivel de resistencia, comportamiento estructural y costo, al utilizar aluminio vs. acero en una estructura de techo, para uso de bodega utilizando los perfiles comercializados en el mercado costarricenses para el año 2021?

3. Justificación

En Costa Rica, al igual que ocurre en una basta cantidad de países a nivel mundial, los diseños de estructuras de techo se realizan comúnmente con materiales como el acero, la madera, entre otros, por su accesibilidad económica, funcionalidad, rapidez de construcción y durabilidad (resistencia al deterioro). Sin embargo, en nuestro país, no se ha demostrado mediante investigaciones la viabilidad de utilizar el aluminio para el diseño de estructuras de techo, valorando los aportes que este pueda generar con respecto a durabilidad, ligereza, bajo costo de mantenimiento, y agilidad constructiva.

Además, es importante considerar las particularidades climáticas de nuestro país, por tratarse de un clima tropical húmedo, lo cual genera deterioro acelerado en los diferentes materiales principalmente en los metales ferrosos.

Continuando con el punto anterior, es importante considerar los costos iniciales (compra de material), así como los gastos que se generan en el mantenimiento de las estructuras a mediano y largo plazo. Siendo de vital importancia tomar en cuenta aspectos que avalen la seguridad y durabilidad de las estructuras que resguardan y garantizan el fin único de salvaguardar la vida.

4. Objetivos

4.1. *Objetivo general*

Realizar un análisis comparativo de una estructura para techo en aluminio vs. una estructura para techo en acero, para uso de bodega utilizando perfiles del mercado costarricense.

4.2. *Objetivos específicos*

1. Realizar una revisión bibliográfica de los métodos y normativas de diseño existentes para aluminio.
2. Determinar el rango de dimensiones de techo, que se pueda construir con los perfiles disponibles en el mercado nacional, iniciando con luces cortas de 10 a 25 metros en rangos de 5 metros y para estructuras bajas de 4 a 6 metros.
3. Comparar las condiciones de servicio (deflexiones) entre ambos materiales.
4. Determinar los niveles de demanda-capacidad del aluminio vs. el acero, para las sollicitaciones de cargas.

5. Alcances y limitaciones

5.1. Alcances

Se tienen como alcances para esta investigación los siguientes puntos:

Se realizará el diseño de una estructura de techo para bodega, haciendo uso del software SAP2000, en el cual los perfiles seleccionados para el diseño, de acuerdo a su función (viga o cercha) deberán ser tomados de los catálogos nacionales, tanto para el modelo en acero como para en aluminio, en el análisis estático el tipo de apoyo considerado será un apoyo articulado para ambos diseños.

De acuerdo a los perfiles disponibles en el mercado, se definirá el rango de tamaño de bodega que se pueda crear con lo que se dispone en el mercado nacional.

Para el diseño estructural se utilizará el CSCR-10, el manual AISC 360-16, se contemplará los “Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica”, además para realizar el diseño estructural en aluminio se hará uso tanto del Manual de Diseño de Aluminio 2010 como también de las erratas disponibles en la página de la Asociación del Aluminio y del Manual de diseño de marcos de aluminio, que dispone el SAP2000 en su más reciente actualización.

Se utilizará un material de ejemplos ilustrativos basados en el Manual de Diseño para aluminio 2020 el cual se encuentra abierto para revisión al público, con el fin compararlo con el manual 2010 y las otras referencias antes citadas para obtener las ecuaciones de diseño más actualizadas.

Se realizará una rápida valoración de costos, de informa indirecta para evaluar los gastos por materiales, izaje y mantenimiento.

Posterior al diseño, se ejecutará un análisis comparativo del comportamiento estructural ante deflexiones, y sus niveles de demanda- capacidad para ambas estructuras, con el fin de definir cuál sistema es más viable y ante cuales condiciones.

5.2. Limitaciones

Los siguientes puntos son considerados como probables limitaciones que se encuentren durante la investigación:

La cantidad de proveedores y el tamaño de los perfiles de aluminio, para uso estructural en nuestro país es limitada.

El número de profesionales de la ingeniería, especializados o con conocimiento en el área estructural en aluminio es realmente bajo.

Acceso limitado al material didáctico (Manual de diseño de aluminio 2020) necesario para la investigación.

No hay investigaciones previas en nuestro país, referentes al diseño de estructuras de aluminio que puedan enriquecer esta investigación.

Se utilizará un material de ejemplos ilustrativos basado en el Manual de Diseño para aluminio 2020 el cual se encuentra abierto para revisión al público, consecuentemente está sujeto a cambios.

6. Delimitaciones

6.1. Delimitación espacial

Para la realización de este análisis comparativo, se tomarán en consideración los costos vigentes en el territorio costarricense, además se consultarán los códigos nacionales que aplican a este tipo de estructuras como lo son el Código Sísmico de Costa Rica 2010, revisión 2014 y los “Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica”; y los manuales internacionales AISC 360-16 y el Manual de Diseño de Aluminio 2010.

6.2. *Delimitación temporal*

Se cuenta con un período comprendido entre Mayo – Diciembre del 2021, para realizar este diseño comparativo y dar como concluida satisfactoriamente la investigación.

Por otra parte, se realiza esta investigación que incluye datos presupuestarios en un momento donde se presenta una condición nacional, tanto de escasez de materiales como de un encarecimiento de los productos importados.

CAPÍTULO II

Fundamentación Teórica

1. Aluminio

Según European Aluminium Association (2016), “El aluminio es un metal muy reciente, extraído por primera vez en 1854 y producido comercialmente como un metal precioso desde 1886, no fue hasta la década de 1950 cuando se comenzó a utilizar en aplicaciones civiles” (p.3).

El aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre pero su proceso de obtención exige un elevado consumo energético. Normalmente se parte de la bauxita que resulta, en una alta proporción de alúmina, sobre la que se trabaja por electrólisis ígnea para obtener el aluminio. Las propiedades del aluminio, sin embargo, compensan dicho balance energético, inicialmente desfavorable. En efecto, tienen un bajo punto de fusión, 660 °C, frente a los 1537 °C del hierro, siendo fácil de conformar (Ramírez, 1999, p.32).

La tasa de reciclaje del aluminio es casi de un 100%, lo que convierte su ciclo de vida como un ciclo sostenible de principio a fin; el reciclar este material ahorra aproximadamente el 95% de la energía utilizada en su producción inicial, por otra parte, su calidad final no se ve alterada al ser sometido al proceso de fundición para su reciclaje.

El aluminio en su estado puro posee muy poca resistencia a la tracción y una dureza escasa, al igual que ocurre con otros materiales como el hierro, por esta razón se ha recurrido a crear aleaciones con otros elementos para mejorar tanto sus propiedades físicas como mecánicas.

Este metal es reconocido en la industria de acuerdo a la composición de su aleación y el temple, como no sucede con el acero que principalmente se identifica por su grado y especificación, como por ejemplo el acero ASTM A 36, ASTM A572 grado 50, entre otros.

Las características y las propiedades del aluminio, para uso estructural, varían en función de los diferentes tipos de aleaciones y del temple que estas reciban.

2. Aleaciones

Las aleaciones consisten en la combinación de dos o más elementos para crear un nuevo material, en los que predomina el aluminio en peso sobre cada uno de los demás.

Según European Aluminium (2020) “En la práctica, solo unos pocos elementos han demostrado ser adecuados como adiciones de aleación en aluminio forjado y producir materiales para aplicaciones estructurales. Estos son:

Cobre (Cu); Manganeso (Mn); Silicio (Si); Magnesio (Mg); Zinc (Zn)” (p.6).

Cada uno estos elementos producen efectos y resultados en las aleaciones, en el caso del **Cobre (Cu)** produce un aumento de las propiedades mecánicas, pero por otra parte reduce la resistencia a la corrosión, el **Manganeso (Mn)** logra incrementar las propiedades mecánicas en la aleación pero reduce la calidad de embutición, el **Silicio (Si)** suele combinarse con el Magnesio (Mg) para obtener mayor resistencia mecánica, así como también el **Magnesio (Mg)** posee alta resistencia después del conformado en frío, y por último el **Zinc (Zn)** reduce la resistencia a la corrosión.

De acuerdo al proceso de producción las aleaciones se dividen en dos grupos:

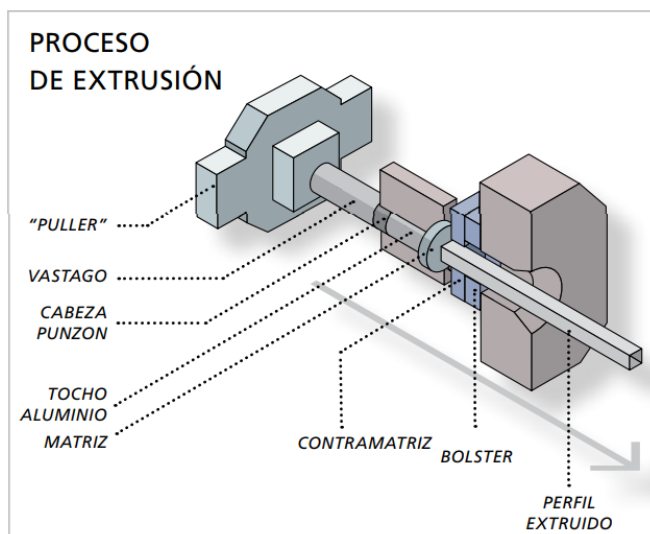
2.1. Aleaciones forjadas

Las aleaciones forjadas son piezas fabricadas por laminación o extrusión, sus propiedades son más uniformes y con una mejor ductilidad que las aleaciones moldeadas.

Proceso de extrusión. Este proceso consiste en introducir un lingote de aluminio caliente a través de un troquel, el cual adquirirá la forma del molde y posteriormente será llamado perfil. Por medio de este proceso se pueden obtener secciones transversales de diferentes formas y tamaños para satisfacer las necesidades estructurales y estéticas solicitadas por los diseñadores. Las secciones extruidas se pueden hallar en formas hueca, sólida y semi hueca.

Figura 1

Esquema del proceso de extrusión para piezas de aluminio



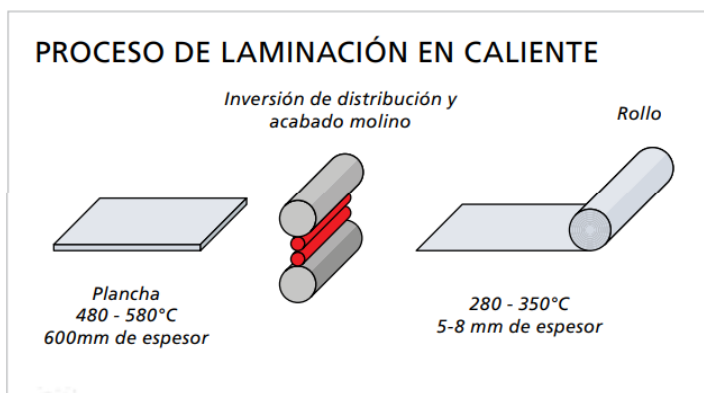
Nota. De *La Sostenibilidad del Aluminio en la Edificación*, por European Aluminium Association, 2016.

Como el proceso de extrusión se realiza en caliente, se debe dar un tratamiento posterior a los perfiles para aumentar su resistencia. Las secciones extruidas poseen mejores propiedades que las demás, razón por la cual precisamente son usados los perfiles extruidos en obras civiles para uso estructural.

Proceso de laminación. Los productos planos de aluminio se obtienen a través del proceso de laminación, mediante el cual grandes planchas de aluminio se introducen en los laminadores y se convierten en láminas de diferentes espesores. El proceso suele comenzar con un método de laminación en caliente, sosteniendo el bloque de un lado a otro a través de un rodillo. La reducción del material final se realiza a través de un proceso de laminado en frío, y la hoja se puede reducir a un espesor de 0,15 mm. La hoja puede ser aún más reducida, llegando en el papel de aluminio a un espesor de 0.007 mm (European Aluminium Association, 2016, p.3).

Figura 2

Esquema del proceso de laminación en caliente para piezas de aluminio



Nota. De La Sostenibilidad del Aluminio en la Edificación, por European Aluminium Association, 2016.

Designación para el aluminio forjado. El sistema de designación para las aleaciones de aluminio más reconocido a nivel mundial es el sistema numérico desarrollado por The Aluminium Association en los Estados Unidos, este también ha sido reconocido en Europa y se utilizan la misma nomenclatura de 4 dígitos.

Seguidamente se muestra la designación establecida por la Asociación del Aluminio para las aleaciones forjadas, donde:

El primer dígito se refiere al grupo de aleación, como se observa en seguida.

Aluminio, 99,00 por ciento y más.	1xxx
Aleaciones de aluminio agrupadas por el principal elemento de aleación	
Cobre	2xxx
Manganeso.	3xxx
Silicio.	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio.	6xxx
Zinc.	7xxx
Otro elemento.	8xxx
Serie no utilizada.9xxx, (The Aluminum Association, 2010, p.IV-8).

El segundo dígito indica las modificaciones de la aleación original o los límites de impurezas. El tercer y cuarto dígito indican la pureza del aluminio o identifican la aleación.

Ciertas aleaciones para mejorar su resistencia, reciben un tratamiento especial térmico, no obstante, este proceso no se puede aplicar a todas las series de aleaciones de aluminio, generando una división en las aleaciones forjadas de la siguiente manera:

2.1.1. Aleaciones forjadas no tratables térmicamente

Estas aleaciones como no pueden recibir tratamiento térmico se deben trabajar en frío para lograr aumentar su resistencia. A pesar de no ser tratables térmicamente, si pueden recibir un tratamiento térmico, pero a calor bajo, con el fin de estabilizar las propiedades y evitar que las resistencias no disminuyan con el tiempo, este proceso se llama tratamiento térmico de estabilización.

Aleaciones 1xxx. Estas aleaciones son muy puras, contienen al menos un 99,9% de aluminio, tiene excelentes propiedades de conducción eléctrica y térmica, posee una alta resistencia a la corrosión, sin embargo, tiene una baja resistencia mecánica de aproximadamente 90 MPa (917kg/cm²) de esfuerzo de fluencia. Se utilizan principalmente para trabajos de laminados en frío, los últimos dos dígitos señalan en igual valor la cantidad en porcentaje que posee de aluminio. Es decir, si el contenido de aluminio representa un 99,45% la serie será 1045.

Aleaciones 3xxx. Su aleante principal es el manganeso (Mn), solo un 1,5% de manganeso se logra adicionar eficazmente. Es utilizado en aplicaciones de resistencia moderada con un esfuerzo de fluencia aproximado de 110 MPa (1121 kg/cm²).

Aleaciones 5xxx. El principal aleante de este grupo es el magnesio (Mg). Tiene una resistencia de moderada a alta, aproximadamente de 193MPa (1966 kg/cm²). Se considera que el magnesio tiene mejores propiedades de endurecimiento que el manganeso, además posee buenas características de soldabilidad y resistencia a la corrosión, sin embargo, un alto contenido de magnesio puede generar corrosión por tensión cuando se exponen altas temperaturas.

2.1.2. Aleaciones forjadas con tratamiento térmico

Las siguientes aleaciones pueden recibir tratamiento térmico para lograr un aumento de su resistencia, ese tratamiento térmico se representa con la letra T, más adelante será abordado este tema con más detalle.

Aleaciones 2xxx. El cobre (Cu) es su principal aleante, aunque también puede contener magnesio (Mg). Estas aleaciones reciben tratamiento térmico para obtener propiedades óptimas, alcanzando las propiedades de los aceros dulces, en caso de recibir un tratamiento térmico T6 logra alcanzar una resistencia a la tracción de hasta 442 MPa (4503 kg/cm²) aproximadamente. Su resistencia a la corrosión no es tan buena como las demás aleaciones y es muy difícil de soldar, como resultado generalmente las uniones se hacen remachadas.

Aleaciones 6xxx. El magnesio y silicio son los elementos principales de aleante, estos forman el de siliciuro de magnesio (Mg₂ Si). Estas aleaciones son tratables térmicamente, de recibir un tratamiento térmico T6 podría alcanzar una resistencia a la tracción de hasta 290MPa (2955kg/cm²), a pesar de todo es menos fuerte que las aleaciones 2xxx y 7xxx. Posee buena resistencia a la corrosión, es fácil de soldar, es la más utilizada en aplicaciones estructurales.

Aleaciones 7xxx. Sus aleantes principales son zinc, magnesio y cobre. Con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 504MPa (5135 kg/cm²) es la más fuerte de todas las aleaciones. Tiene buena resistencia a la corrosión, sin embargo, la serie 7xxx aleada con cobre posee una menor resistencia. Sus propiedades soldables son muy buenas debido a que son auto templables, sin verse afectada su resistencia por la presencia de calor.

2.1.3. Otras aleaciones

Aleaciones 4xxx. Su mayor aleante es el silicio, la adición de este elemento en cantidades consideradas logra disminuir el punto de fusión sin afectar su resistencia, la mayoría de estas aleaciones no reciben tratamiento térmico, la aleación 4043 se usa comúnmente para alambre de relleno de soldadura.

Aleaciones 8xxx. Posee elementos de hierro y níquel como aleante, para aumentar su resistencia sin perder conductividad eléctrica. La aleación de aluminio-litio 8090 tiene una rigidez y resistencia muy alta, desarrollada principalmente para fines aeroespaciales.

Aleaciones 9xxx. Actualmente esta serie no esta es uso.

2.2. *Aleaciones moldeadas*

Este proceso consiste en verter el material en moldes para obtener su forma, este tipo de aleaciones poseen una variación de sus propiedades y son menos dúctiles que las forjadas.

Designación para el aluminio moldeado. Su clasificación difiere de las forjadas porque tienen los primeros tres dígitos separados por un punto decimal donde:

El primer número nos dice cuál es ese elemento principal de aleación.

Aluminio, 99,00 por ciento mínimo y más.	1xx.x
Aleaciones de aluminio agrupadas por elementos principales de aleación	
Cobre	2xx.x
Silicio, con cobre y / o magnesios añadidos.	3xx.x
Silicio.	4xx.x
Magnesio	5xx.x
Zinc.	7xx.x
Estaño	8xx.x
Otro elemento.	9xx.x
Serie no utilizada.6xx.x

(The Aluminum Association, 2010, p. IV-10)

Los otros dos datos nos brindan información de aleaciones dentro del mismo grupo.

Y, finalmente

El último dígito denota la forma del producto; 1 o 2 para barras (dependiendo del nivel de impureza) y 0 para piezas de fundición. Para indicar una modificación en la aleación original se antepone una letra mayúscula A, B, C, etc. omitiendo la I, O, Q y X la cual está reservada para aleaciones experimentales (Marmolejo Castro, 2014, p.8).

Aleaciones 1xx.x. Aluminio puro en un 99% o más, el último número después del punto nos dice la forma del producto, si hay un cero (1xx.0) se refiere a piezas de fundición y si existe un uno (1xx.1) se trata de lingote.

Aleaciones 2xx.x - Aleaciones 9xxx. Para este grupo de aleaciones el dígito dos y tres solo hace referencia a los diferentes grupos de aleaciones de aluminio, y el cuarto número indica la forma del producto, donde xxx.0 se refiere a un producto de fundición, xxx.1 indica lingote con límites de composición química y xxx.2 son lingotes con límites de composición química que difieren, pero caen dentro los límites de xxx.1, en otras palabras, es una variedad de la serie xxx.1.

3. Temple

El temple consiste en un proceso al que se somete un metal en su estado sólido, para que este reciba una alteración en sus propiedades mecánicas, con el fin de aumentar sus capacidades de resistencia y de dureza. De acuerdo a lo indagado, en la clasificación de las aleaciones de aluminio no todas son capaces de recibir tratamientos térmicos, este grupo que no son tratables térmicamente para ser reforzadas se deben de trabajar en frío. Por lo tanto, el proceso de temple se divide en tratamiento térmico y endurecimiento por deformación.

3.1. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es un proceso de calentamiento y enfriamiento de un metal, el cual genera mayor resistencia en el material, más sin embargo lo vuelve más dúctil dificultando por otra parte la trabajabilidad, este se divide en tratamiento térmico por solución y tratamiento térmico por precipitación.

Tratamiento térmico por solución. En el tratamiento térmico por solución se someten las piezas de aluminio recocido a altas temperaturas, una vez alcanzada la temperatura requerida se extrae del horno y se provoca un enfriamiento brusco por medio de agua o aire, este mecanismo de enfriamiento impide la precipitación de los compuestos Inter metálicos.

Tratamiento térmico por precipitación. Para este proceso se lleva el aluminio al horno a altas temperaturas, pero su enfriamiento se da lentamente a temperatura ambiente.

3.2. Endurecimiento por deformación

Este proceso consiste en un tratamiento mecánico que se realiza a esas aleaciones que al ser sometidas a calor en vez de producirse un endurecimiento se produce es un ablandamiento del material, por lo tanto, para lograr un aumento de la resistencia en el metal estas aleaciones se someten a un proceso de deformación mecánica a temperatura ambiente.

3.3. Clasificación de temple

Esta segunda parte de designación es similar al de las aleaciones, es la misma designación de temple tanto para las aleaciones forjadas como para las aleaciones fundidas, esta codificación va seguida de la designación de las aleaciones y dividida por un guion, donde el primer dígito se trata de una letra que hace referencia al proceso que ha sido sometido el aluminio, seguido por uno o más números que indica el grado de temple logrado.

F. Cuando se habla de esta designación, se hace referencia a los productos que logran tener un cierto grado de temple durante el proceso de manufactura.

O. Esta letra se le asigna a un producto forjado que ha sido recocido o recristalizado, este tipo de temple solo produce resistencias bajas.

H. Este grupo son excepcionalmente aquellas aleaciones forjadas en las que se logra un aumento de su resistencia debido a un endurecimiento por deformación. Como se menciona anteriormente, el primer dígito (H) se refiere al tipo de temple, el número que acompaña esta letra hace referencia al grado de endurecimiento, donde 1 es un endurecimiento inicial y 8 es el endurecimiento más alto, por último, el valor de 9 es considerado como extraduro.

W. Esta designación es solo para aquellas aleaciones tratadas térmicamente por solución que presentan un envejecimiento espontáneamente a temperatura ambiente después de ser tratados.

T. Esta letra nos dice que el material ha recibido un tratamiento térmico, con características diferentes a la de los temples descritos anteriormente, el otro dígito que acompaña esta designación se refiere al temperamento que ha sido producido.

Según The Aluminum Association (2010) Números del 1 al 10 seguidos de la T indica la secuencia de tratamientos básicos, como sigue:

T1. Enfriado a partir de un proceso de modelado a temperatura elevada y envejecido naturalmente hasta una condición sustancialmente estable.

T2. Enfriado a partir de un proceso de modelado a temperatura elevada, trabajado en frío, y naturalmente envejecido a una condición sustancialmente estable.

T3. Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida naturalmente a una condición sustancialmente estable.

T4. Solución tratada térmicamente y envejecida naturalmente a una condición sustancialmente estable.

T5. Enfriado a partir de un proceso de modelado a temperatura elevada y luego envejecido artificialmente.

T6. Solución tratada térmicamente y luego envejecido artificialmente.

T7. Solución tratada térmicamente y sobre envejecida /estabilizada.

T8. Solución tratada térmicamente, trabajada en frío, y luego artificialmente envejecida.

T9. Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y luego trabajada en frío.

T10. Enfriado a partir de un proceso de modelado a temperatura elevada, trabajado en frío y luego envejecido artificialmente (p IV-14).

Con el fin de demostrar cuales son las aleaciones utilizadas para el diseño y construcción en aluminio y las razones por que se utilizan, se explicaron tanto los procesos de fabricación, como los procesos de temple y las designaciones. Es así como en la industria de la construcción y en la literatura se va a encontrar que las series seleccionadas para este tipo de proyectos son generalmente 6005-T6, 6061-T6 y 6063-T6 principalmente.

4. Comparación del aluminio contra el acero

El aluminio tiene una serie de particularidades que lo han convertido en un material competitivo y muy eficaz para la construcción estructural, la siguiente comparación hace referencia al tipo de aleación AA 6063-T6 por ser principalmente una de las más utilizadas en el diseño de estructuras y seleccionada para esta investigación.

1. Tiene una densidad de 2700 kg/m^3 , este representa casi un tercio con respecto al acero, cuya densidad es de 7850 kg/m^3 .
2. Algunas aleaciones de aluminio poseen una resistencia a la tracción muy similar a la del acero A 653 utilizado comúnmente en nuestro país en el sector de la construcción.
3. Tiene una excelente resistencia a la corrosión comparada con otros metales, esta característica genera un ahorro a largo plazo, en cuanto al mantenimiento de las estructuras.
4. El diseño estructural del aluminio es muy similar al diseño estructural en acero.
5. El módulo de elasticidad del aluminio es de 10100 ksi, mientras que para el acero el módulo de elasticidad es de 29000 ksi, el cual representa casi un tercio menos.
6. Relacionado con altas temperaturas, las aleaciones de aluminio son menos resistentes que el acero, por su factor de expansión térmico.
7. En cuanto a peso, se puede decir que el aluminio puede generar un ahorro en los costos de izaje, por ser un casi un tercio más liviano que el acero.
8. El aluminio no se vuelve frágil a bajas temperaturas como ocurre con el acero, si no que más bien se fortalece.
9. Posee un esfuerzo de fluencia (F_y) de 25 ksi, mientras que para el acero A 653 su esfuerzo de fluencia (F_y) es de 33 ksi.
10. El esfuerzo ultimo (F_u) para el acero es de 45 ksi y para el aluminio es de tan solo (F_u) 30 ksi.

5. Normas para el diseño estructural

En nuestro país no se cuenta con normativa para el diseño estructural en aluminio, sin embargo, si se posee normativa para el diseño estructural; una de ellas establece criterios para el diseño sísmico, y la otra establece lineamientos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño, estas normativas son las siguientes:

5.1. Normas nacionales

- a) Código sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR-10), revisión 2014.
- b) Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021.

Con respecto a los materiales el país no posee normativas, pero se basa en normativas internacionales como ocurre con el acero y el concreto.

Para este trabajo de investigación se indagarán las siguientes normas internacionales:

5.2. Normas internacionales

- a) American Institute of Steel Construction 360-16 (AISC 360-16).
- b) Aluminum Design Manual 2010 (ADM 2010).
- c) Euro Código 9.
- d) International Building Code 2018 (IBC).

6. Métodos de diseño

Los métodos más utilizados por las diferentes especificaciones de diseño en la ingeniería civil son:

- Método de diseño por esfuerzos admisibles (ASD).
- Método de diseño por factor de carga y resistencia (LRFD).

6.1. Método de diseño por esfuerzos admisibles (ASD)

Este método determina que la resistencia permisible del elemento debe ser mayor o igual que la resistencia determinada sobre la base de las combinaciones de cargas por el método ASD.

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

R_a = fuerza requerida

R_n = fuerza nominal

Ω = factor de seguridad

R_n / Ω = resistencia permitida

6.2. Método de diseño por factor de carga y resistencia (LRFD)

Esta teoría es recomendada por el Código Sísmico de Costa Rica y la más utilizada en nuestro país, por lo tanto, para el diseño estructural tanto en aluminio como en acero se empleará esta metodología.

En este método la resistencia de diseño de los elementos debe ser igual o mayor a la fuerza requerida determinada sobre la base de las combinaciones de carga LRFD.

$$R_u \leq \phi R_n$$

Ecuación 2

Dónde:

R_u = fuerza requerida

R_n = fuerza nominal

ϕ = factor de resistencia

ϕR_n = resistencia de diseño

7. Factores de seguridad

El factor de seguridad en el diseño se encarga de cubrir todas aquellas incertidumbres existentes tanto por la variabilidad de los materiales, como también en el mecanismo de diseño.

Los siguientes valores son los factores de seguridad dados ya sea para el diseño ASD o para el diseño LRFD dispuestos en el “*Manual de Diseño de Aluminio*” llamado de aquí en adelante (ADM).

Tabla 1

Factores de seguridad para métodos de diseño ASD y LRFD

Estado Límite	ϕ_t	Ω_t	Ω_t
	Edificios	Edificios	Puentes
Ruptura	0.75	1.95	2.20
Fluencia	0.90	1.65	1.85

Nota. Transcrito y traducido por la autora, con datos tomados de *Aluminum Design Manual*, capítulo D, 2010.

8. Diseño estructural para aluminio

En esta primera parte, antes de iniciar a hablar del diseño en aluminio, se aclara que todas las fórmulas utilizadas en esta sección para definir los estados límites necesarios para el cálculo de cada una de las resistencias han sido tomadas de las siguientes referencias: ADM 2010, documento en revisión del Manual de Diseño de Aluminio 2020, erratas del ADM 2015 y ADM 2020 que están disponibles en la página web de la Asociación del Aluminio, también se indagó el manual Aluminum Frame Design Manual AA2020 disponible en el software SAP2000 v23.

Tras el estudio y comparación de estos documentos se busca presentar en este trabajo las ecuaciones más actualizadas para el diseño. Por otra parte, solo se presentarán en este documento las ecuaciones utilizadas para miembros sin soldar y con forma simétrica.

Además, es importante tener presente que los perfiles utilizados estructuralmente son perfiles extruidos y para esta ocasión se trabajara con la aleación 6063-T6 cuyas propiedades han sido descritas anteriormente.

La siguiente figura muestra algunas propiedades del aluminio, necesarias para el diseño estructural.

Figura 3

Propiedades generales del aluminio

Property	Symbol	Value
Poisson's ratio	ν	0.33
Shear modulus of elasticity	G	$3E/8$
Coefficient of thermal expansion	α	$13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F} = 23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Density	γ	$0.10 \text{ lb/in}^3 = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Shear yield strength	F_{sy}	$0.6 F_{ty}$

Nota. De *Aluminum Design Manual*, por The Aluminum Association, 2010.

8.1. Resistencia nominal a tensión

El ADM establece en su capítulo D que la resistencia nominal a tensión será la menor resistencia de los estados límites de esfuerzo de fluencia en el área gruesa (área total de la sección transversal) y el esfuerzo de ruptura en el área neta, la condición de menor valor es la que rige el diseño del elemento a tensión.

De aquí en adelante se nombra E.L como abreviación para referirse a estado límite.

E.L.#1. Esfuerzo de fluencia en el área gruesa

$$P_n = F_{ty}A_g \quad \text{Ecuación 3}$$

E.L.#2. Esfuerzo último en el área neta

$$P_n = \frac{F_{tu}A_e}{K_t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde K_t depende del tipo de aleación, para este estudio K_t es igual a 1, este dato se encuentra en las tablas de propiedades mecánicas según el tipo de aleación, en el capítulo A del ADM.

8.2. Resistencia nominal a compresión

Para el diseño a compresión se asume que no existe área neta, por lo tanto, no se usa el valor de esfuerzo último, del mismo modo que ocurre para el análisis de elementos en acero. El ADM establece en la parte I, capítulo E que la resistencia a compresión de un elemento es el menor valor de esfuerzo para los estados límites de pandeo global, pandeo local e interacción del pandeo global y pandeo local.

E.L.#1. Pandeo global

Para evaluar la resistencia por pandeo en los miembros estructurales se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_n = F_c A_g \quad \text{Ecuación 5}$$

Si $\lambda \leq \lambda_1$

$$F_c = F_{cy} \quad \text{Ecuación 6}$$

Si $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$

$$F_c = (B_c - D_c \lambda) \left(0.85 + 0.15 \frac{C_c - \lambda}{C_c - \lambda_1} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Si $\lambda \geq \lambda_2$

$$F_c = \frac{0.85\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$$\lambda_1 = \frac{(B_c - F_{cy})}{D_c} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\lambda_2 = C_c \quad \text{Ecuación 10}$$

El valor D_c , C_c y B_c también conocidos como constantes de pandeo se calcula a partir de las ecuaciones que se encuentran en las tablas B.4.1 y B.4.2 en el ADM 2010, como también se encuentra sus valores según el tipo de aleación en la Tabla 1-1 y Tabla 1-2 capítulo VI.

E.L.#2. Pandeo local

Este estado límite se determina utilizando el método de promedio ponderado según la siguiente ecuación:

$$P_n = \sum_{i=1}^n F_{ci}A_i + F_{cy} \left(A_g - \sum_{i=1}^n A_i \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

F_{ci} : esfuerzo de pandeo local del elemento i .

A_i : área del elemento i (*alma y ala*).

Si $\frac{b}{t} < \lambda_1$

$$F_c = F_{cy} \quad \text{Ecuación 12}$$

Si $\lambda_1 < \frac{b}{t} < \lambda_2$

$$F_c = B_p - 1.6D_p \left(\frac{b}{t} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Si $\frac{b}{t} \geq \lambda_2$

$$F_c = \frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{1.6 \frac{b}{t}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$$\lambda_1 = \frac{(B_p - F_{cy})}{(1.6D_p)} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\lambda_2 = \frac{k_1 B_p}{1.6D_p} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\frac{b}{t} = \frac{(d - 2t_f)}{t_w} \quad \text{Ecuación 17}$$

Se debe calcular b/t tanto para el alma o como para el ala de la sección, en caso de tratarse de un tubo rectangular.

E.L.#3. Interacción entre pandeo global y pandeo local

Una vez verificados los estados límites anteriores para pandeo, se procede a revisar el pandeo local elástico F_e de los elementos, el cual requiere que, si la tensión de pandeo local elástica de cualquier elemento es menor que la tensión de pandeo global, la resistencia del pandeo global se debe reducir a partir de la siguiente ecuación.

El límite de pandeo global es:

$$P_n = \left[\frac{0.85\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} F_e^{\frac{2}{3}} A_g \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde el valor de F_e depende del tipo de elemento:

$$F_{ei} = \begin{cases} \frac{\pi^2 E}{\left(5.0 \frac{b}{t}\right)^2} & \text{apoyo en un borde} \\ \frac{\pi^2 E}{\left(1.6 \frac{b}{t}\right)^2} & \text{apoyo en ambos bordes} \\ \frac{\pi^2 E}{16 \left(\frac{R_b}{t}\right) \left(1 + \frac{\sqrt{R_b/t}}{35}\right)^2} & \text{elemento curvo} \end{cases} \quad \text{Ecuación 19}$$

Para el caso de tubos rectangulares o cuadrados F_{ei} se calcula tanto para el alma como para el ala y rige el de menor valor.

Una vez verificados los tres estados límite, rige el menor de todos como valor crítico para el cálculo de la resistencia de diseño por compresión.

8.2.1. Esbeltez del elemento (λ)

Se deben evaluar las dos siguientes condiciones de esbeltez, donde el valor de λ será el mayor de los dos.

1. Pandeo por flexión

Para determinar la esbeltez, se toma el mayor resultado de esbeltez de los ejes (x, y) del miembro.

$$\lambda = \frac{L_c}{r} \quad \text{Ecuación 20}$$

2. Pandeo por torsión o flexo-torsión en elementos doblemente simétricas.

$$\lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{F_e}} \quad \text{Ecuación 21}$$

El valor de F_e (esfuerzo de pandeo elástico) será calculado de acuerdo a la simetría de los elementos:

Doble simetría:

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 E C_w}{(k_z L_z)^2} + GJ \right) \frac{1}{I_x I_y} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

$K_z = 0.5$ (Dado a que el alabeo y la torsión están restringidos en el extremo del elemento).

8.3. Resistencia nominal a flexión

Para determinar la resistencia a flexión de un elemento de aluminio se deben evaluar los estados límites de fluencia, ruptura, pandeo local y pandeo lateral- torsional, donde el menor de los cuatro será el que rige para el diseño a flexión.

E.L.#1. Fluencia

Para determinar la resistencia nominal a flexión en el estado límite de fluencia se tomará el menor valor de:

$$M_{np} = Z F_{ty} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$M_{np} = 1.5 S_t F_{ty} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$M_{np} = 1.5 S_c F_{cy} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde Z es el módulo plástico, S_t y S_c son módulos de sección en tensión o compresión.

E.L.#2. Ruptura

$$M_{nu} = \frac{ZF_{tu}}{k_t}$$

Ecuación 26

E.L.#3. Pandeo local

La resistencia nominal a flexión se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_{nlb} = F_c \frac{I_f}{c_{cf}} + F_b \frac{I_w}{c_{cw}}$$

Ecuación 27

Donde:

F_c : esfuerzo de compresión uniforme.

F_b : esfuerzo de compresión por flexión.

c_{cf} : distancia desde la línea central sujeta a compresión uniforme hasta el eje neutro elástico del elemento.

c_{cw} = distancia de fibra extrema en compresión de un elemento sometido a flexo compresión hasta el eje neutro elástico.

I_f = momento de inercia del elemento sujeto a esfuerzo de compresión uniforme sobre el eje neutro de la sección.

I_w = momento de inercia del elemento sujeto a esfuerzo deflexo-compresión sobre el eje neutro de la sección.

Para determinar el valor de F_c se sigue el mismo procedimiento utilizado anteriormente en la sección 8.2 para el estado límite de pandeo global.

El valor F_b se determina como muestra a continuación:

Si $\lambda \leq \lambda_1$

$$F_b = 1.5F_{cy} \quad \text{Ecuación 28}$$

Si $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$

$$F_b = (B_{br} - mD_{br}) \left(\frac{b}{t} \right) \quad \text{Ecuación 29}$$

Si $\lambda \geq \lambda_2$

$$F_c = \frac{k_2 \sqrt{B_{br} E B_{br}}}{m \frac{b}{t}} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

$$\lambda_1 = \frac{(B_{br} - 1.5F_{cy})}{mD_{br}} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\lambda_2 = \frac{k_1 B_{br}}{mD_{br}} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$m = \begin{cases} 1.15 + \frac{c_o}{2c_c} & -1 < \frac{c_o}{c_c} < 1 \\ \frac{1.3}{1 - \frac{c_o}{c_c}} & \frac{c_o}{c_c} \leq -1 \\ 0.65 & c_c = -c_o \end{cases} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

C_c : distancia desde el eje neutro elástico hasta la fibra extrema del elemento, su valor es negativo.

C_o : distancia desde el eje neutro elástico a la otra fibra extrema, tiene valor positivo.

El valor de k_1 o k_2 se determina según la siguiente figura:

Figura 4

Constantes de Pospandeo

Type of Element	k_1	k_2
Flat Elements in Compression for Temper Designations Beginning with O, H, T1, T2, T3, or T4, and weld-affected zones of all tempers	0.50	2.04
Flat Elements in Compression for Temper Designations Beginning with T5, T6, T7, T8, or T9	0.35	2.27
Flat Elements in Flexure	0.50	2.04

Nota. De *Aluminum Design Manual*, por The Aluminum Association, 2010.

E.L.#4. Pandeo lateral-torsional

La esbeltez para el pandeo lateral-torsional de elementos cerrados es:

$$\lambda = 2.3 \sqrt{\frac{L_b S_{xc}}{C_b \sqrt{I_y J}}} \quad \text{Ecuación 34}$$

En esta investigación de manera conservadora se utilizó 1 para el valor de C_b .

Si $\lambda < C_c$

$$M_{nmb} = M_{np} \left(1 - \frac{\lambda}{C_c}\right) + \frac{\pi^2 E \lambda S_{xc}}{C_c^3} \quad \text{Ecuación 35}$$

Si $\lambda \geq C_c$

$$M_{nmb} = \frac{\pi^2 ES_{xc}}{\lambda^2} \quad \text{Ecuación 36}$$

8.4. Resistencia nominal a cortante

Para determinar la resistencia nominal a cortante, será el menor de los estados límites de fluencia y pandeo por cortante junto con ruptura por cortante.

E.L.#1. Ruptura por cortante

$$V_n = F_{su} \frac{A_n}{k_t} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

A_n : área neta del alma paralela a la dirección del cortante.

E.L.#2. Fluencia y pandeo por cortante

$$V_n = F_{sy} A_v \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

$$A_v = dt_w$$

9. Diseño de conexiones

Existen varias técnicas para el diseño de conexiones, sin embargo, los métodos más utilizados hoy en día tanto para unir los elementos estructurales en acero como en aluminio son las conexiones mecánicas y las conexiones soldadas.

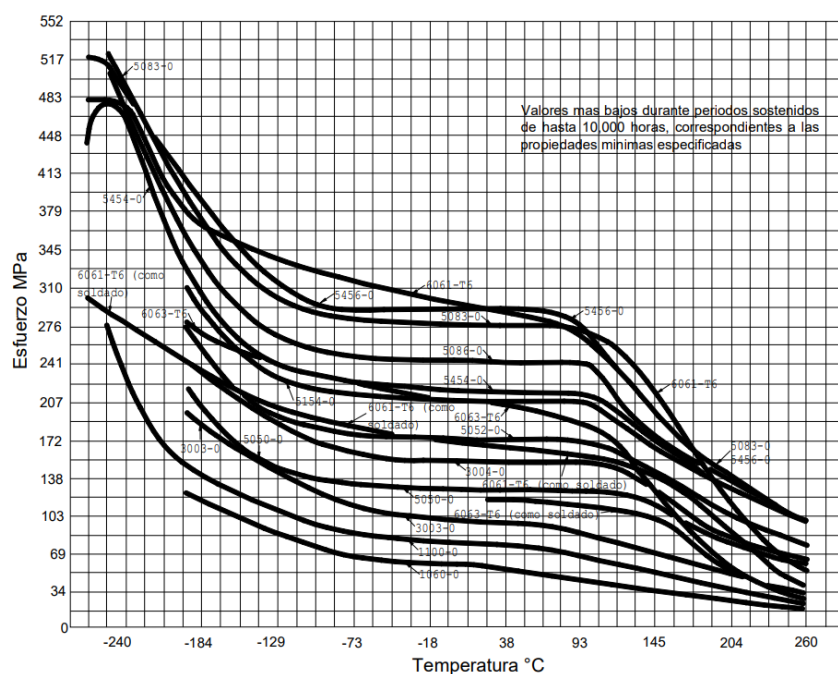
En cuanto a conexiones mecánicas, podríamos decir que el proceso de montaje de las estructuras es más rápido que cuando su proceso de unión se realiza mediante soldadura, y por otra parte su ejecución requiere de mano de obra menos especializada que para las uniones soldadas.

Es muy común encontrar las estructuras de aluminio unidas mediante conexiones mecánicas, una de las causas principales es la reducción de la resistencia del material que se provoca al someter el aluminio a ciertas temperaturas, por lo cual las conexiones empernadas se convierten en una excelente opción cuando se requiere conservar las propiedades mecánicas.

El siguiente cuadro muestra la variación de la resistencia del aluminio ante la temperatura.

Figura 5

Comportamiento del aluminio ante la variación de la temperatura.



Nota. De Manual de diseño de estructuras de aluminio, por Marmolejo Castro, 2014.

En el cuadro anterior se observa como a medida que la temperatura aumenta, y principalmente a partir de los 95°C la resistencia de las aleaciones disminuye, sin embargo, se presenta otro fenómeno y es que también a medida que disminuye la temperatura su resistencia aumenta.

Esta variación de la resistencia ante altas temperaturas es aproximadamente menor que un 50% de su resistencia inicial, de acuerdo al ADM 2010 Tabla A.3.4 para la aleación 6063-T6 seleccionada para este estudio, su F_u y F_y son 30 ksi y 25 ksi respectivamente, más sin embargo al revisar la Tabla A.3.5 de las propiedades mecánicas de productos extruidos donde se considera la afectación por la soldadura, dice que para la aleación 6063-T6 el F_u y F_y son de 17 ksi y 8 ksi, es un punto muy importante de considerar antes de tomar la decisión sobre el tipo de conexión a utilizar para elementos de aluminio.

Seguidamente se muestra algunas de las consideraciones para el diseño de conexiones mecánicas que dispone el ADM en su capítulo J.

9.1. Agujeros

Establece que el diámetro nominal del agujero estándar debe ser 1/16 de pulgada mayor que el diámetro del perno.

9.2. Separación entre pernos y distancia a bordes

La separación mínima centro a centro entre pernos no debe ser menor a 2.5 veces el diámetro nominal de los pernos, además la distancia mínima desde el centro del perno hasta el borde de la pieza no debe ser menor que 1.5 veces el diámetro del perno con el fin de evitar un posible desgarre del metal u otro tipo de falla.

9.3. Tipos de pernos y material

El ADM 2010 indica en la parte J.3 que los pernos pueden ser ya sea de aluminio (2024-T4, 6061-T6, 7075-T73) que cumplan con la norma ASTM F 468, como también pueden ser de acero al carbón (no usar A 490 por su fragilidad al galvanizarse) que cumplan con ASTM A153 o ASTM B695, o acero inoxidable (serie 300) que cumplan con ASTM F 594 o A 194. Para más detalle consultar el capítulo J diseño de conexiones del Manual de Diseño en Aluminio.

Estos elementos deben de tener un recubrimiento adecuado como zinc para proporcionar protección contra la corrosión, por otra parte, la dureza de los pernos debe ser menor que Rockwell C35.

9.4. Conexiones empernadas

El Manual de diseño en aluminio menciona dos tipos de conexiones mecánicas las cuales son:

Conexiones de fricción

Las placas que están en contacto deben tener un proceso de chorro de arena con escoria de carbón, para producir un perfil de anclaje de 0.5 mm [2.0 mils] para generar un coeficiente de fricción de 0.5. Estas superficies de aluminio, pueden estar en contacto con superficies de aluminio con un tratamiento similar, o con superficies de acero con una capa de pintura de 0.1 mm [4 mils]. Únicamente se pueden usar tornillos A325 con recubrimiento de zinc, para prevenir la corrosión galvánica entre el tornillo de acero y las partes de aluminio (Kissell, 2002). Las placas de aluminio que van a ser conectadas deben tener una resistencia de fluencia mínima a tensión de 105 MPa [1054 kg/cm²] para evitar que el tornillo dañe al aluminio. Debido a estas limitaciones, las conexiones de fricción solo se usan en estructuras con aleaciones de aluminio muy resistentes (Marmolejo Castro, 2014, p.83).

De la misma manera lo establece el ADM 2010 en el capítulo J.3.8.

Los pernos deben cumplir con ASTM A 325, las tuercas deben cumplir con ASTM A 563 grado DH o ASTM A 194 grado 2H, y las arandelas deben cumplir con ASTM F426. Los pernos, tuercas y arandelas deben de tener un recubrimiento de zinc o de acuerdo a la especificación ASTM A325. Con el fin de prevenir la corrosión entre las partes tornillo, placa y perfil de aluminio (Aluminum Design Manual, 2010, p. I-58).

Conexiones por aplastamiento

En la práctica del aluminio es de las más comunes, según (Marmolejo Castro, 2014) este tipo de conexiones, se diseñan bajo la suposición de que las partes conectadas se pueden deslizar una con respecto de otra, y además el tornillo puede aplastar un lado del agujero bajo cargas de diseño. En conexiones por aplastamiento solo se permiten los agujeros estándar, y si se utilizan agujeros con ranura estos deben orientarse de manera que la carga sea perpendicular a la ranura (p.83).

9.5. Estados límites en el elemento para el diseño de la conexión

E.L.#1. Esfuerzo por desgarre y aplastamiento

$$R_n = d_e t F_{tu} \leq 2 D t F_{tu} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

d_e : distancia a borde.

D : diámetro nominal del perno.

t : espesor.

E.L.#2. Esfuerzo por bloque de cortante

$$R_n = \left[F_{su} \left(\frac{A_{nv} + A_{gv}}{2} \right) + F_{tu} A_{nt} \right] / k_t \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

$k_t = 1$.

$F_{su} = 0.6 F_{tu}$.

9.6. Resistencia nominal para pernos de aluminio

$$R_n = (\pi D^2 / 4) F_{su} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

$\phi = 0.65$ (LRFD)

10. Deflexiones permisibles

Para la verificación de los límites de deflexiones permitidas en una estructura, se utilizará The International Building Code, 2018 (IBC, 2018), con el fin de comparar el comportamiento de ambas estructuras ante esta condición.

La siguiente tabla muestra los límites permitidos por este código:

Figura 6

Límites de deflexión

TABLE 1604.3
DEFLECTION LIMITS^{a, b, c, h, i}

CONSTRUCTION	L or L _v	S or W ^f	D + L ^{g, o}
Roof members: ^e			
Supporting plaster or stucco ceiling	//360	//360	//240
Supporting nonplaster ceiling	//240	//240	//180
Not supporting ceiling	//180	//180	//120
Floor members	//360	—	//240
Exterior walls:			
With plaster or stucco finishes	—	//360	—
With other brittle finishes	—	//240	—
With flexible finishes	—	//120	—
Interior partitions: ^b			
With plaster or stucco finishes	//360	—	—
With other brittle finishes	//240	—	—
With flexible finishes	//120	—	—
Farm buildings	—	—	//180
Greenhouses	—	—	//120

Nota. De *International Building Code*, por International Code Council, 2018.

De acuerdo a la tabla anterior y relacionado a este estudio, se verificará los límites de deflexión para carga viva, carga permanente más carga viva, como también para la carga por viento, de acuerdo a lo establecido tanto por este código como por los *Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica*, la carga de viento debe ser calcula con un período de retorno de 10 años.

11. Diseño por viento

El viento suele ser un gran problema para las estructuras de los techos, es por esto que su afectación debe ser considerada para su diseño, de acuerdo a lo que establece la nueva normativa llamada “Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica” (2021), se debe de seguir los siguientes pasos para determinar la fuerza ejercida por el viento sobre la estructura.

11.1. Presión básica del viento

$$q_b = 0.005V_b^2 \left(\frac{kg}{m^2} \right) \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

V_b : velocidad básica del viento (km/h).

11.2. Presión de viento

La presión del viento se debe evaluar de acuerdo a la altura (z) de la estructura, según la siguiente ecuación:

$$q(z) = q_b C_e(z) C_r C_t C_d \left(\frac{kg}{m^2} \right) \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde:

$C_e(z)$: Coeficiente de exposición.

C_r : Coeficiente de recurrencia.

C_t : Coeficiente topográfico.

C_d : Coeficiente de direccionalidad.

1. Coeficiente de exposición

Tras evaluar la siguiente ecuación, el coeficiente de exposición para el diseño será la condición mayor de las siguientes:

$$C_e(z) = 2.01 \left(\frac{z}{z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}} \geq 2.01 \left(\frac{z_{min,e}}{z_{ge}} \right)^{\frac{2}{\alpha_e}} \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

α_e : parámetro de rugosidad.

z_g : altura de capa límite (m).

z_{min} : altura de presión mínima (m).

2. Coeficiente de recurrencia

Este coeficiente puede variar según el nivel de demanda y la categoría de desempeño, los cuales se encargan de determinar el periodo de retorno (T_R).

$$C_r = [0.36 + 0.10 \ln(12T_R)]^2 \quad \text{Ecuación 45}$$

3. Coeficiente topográfico

Se debe de verificar una serie de condiciones en relación a la ubicación de la estructura para determinar si la velocidad del viento es afectada por la topografía del terreno, si no se cumple con esos criterios, los Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, establece en su capítulo 3.3.3 que C_t es igual a 1.

4. Coeficiente de direccionalidad

El coeficiente de direccionalidad es determinado a partir de la siguiente tabla:

Figura 7

Coeficientes de direccionalidad

Tipo de edificación	Factor de direccionalidad, C_d
Edificaciones	
<i>Sistema Principal Resistente a Fuerza de Viento</i>	0.85
<i>Componentes y Revestimiento</i>	0.85
<i>Techos arqueados</i>	0.85
Chimeneas, Tanques, y Edificaciones Similares	
<i>Cuadradas</i>	

Nota. De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021.

11.3. Acciones de viento

El efecto del viento impacta las estructuras tanto externamente como internamente, el impacto externo se da directamente, pero el impacto interno se da por la presencia de aberturas que permiten la entrada del viento, la cual produce una dirección de impacto contraria a la presión externa.

Presión Interna

La presión interna varía de acuerdo al tipo de cerramiento considerado en el diseño de la estructura, por lo tanto, la presión de viento será modificada por coeficientes de forma ya sea para techos o para paredes.

Figura 8

Coeficientes de presión interna para techos y paredes

Clasificación	GC_{pi}
Edificios abiertos	0
Edificios parcialmente cerrados	+0.55
	-0.55
Edificios cerrados	+0.18
	-0.18

Nota. De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021.

Presión Externa

El impacto del viento sobre la estructura externamente, tanto para techos como para paredes se debe modificar por factores relacionados con su tamaño tanto en planta como en altura, así como también se valora la pendiente de diseño en los techos.

Figura 9

Coeficientes de presión externa, C_p para muros

Superficie	L/B	C_p	Uso con
Barlovento	Todos	0.8	q _z
Sotavento	0-1	-0.5	q _h
	2	-0.3	
	≥4	-0.2	
Laterales	Todos	-0.7	q _h

Nota. De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021.

Figura 10

Coefficientes de presión externa, C_p para techos

Dirección del viento	Barlovento									Sotavento			
	Ángulo ϕ (grados)									Ángulo ϕ (grados)			
	h/L	10	15	20	25	30	35	45	≥ 60	10	15	≥ 20	
Normal a la cubierta para $\phi \geq 10^\circ$	≤ 0.25	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	0.0*			-0.3	-0.5	-0.6	
		-0.18	0.0*	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.01 ϕ				
	0.5	-0.9	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	0.0*		-0.5	-0.5	-0.6	
		-0.18	-0.18	0.0*	0.2	0.2	0.3	0.4	0.01 ϕ				
	≥ 1.0	-1.3**	-1.0	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	0.0*		0.01 ϕ	-0.7	-0.6	-0.6
		-0.18	-0.18	-0.18	0.0*	0.2	0.2	0.3					
Normal a la cubierta para $\phi < 10^\circ$ y paralelo a la cubierta para todos los valores de ϕ	≤ 0.5	Distancia horizontal desde el borde a barlovento					C_p			*Valor indicado para usar en interpolaciones. **El valor puede reducirse linealmente con el área sobre la cual es aplicada como sigue: Área (m²) Reduce Factor			
		0 a h/2						-0.9	-0.18				
		h/2 a h					-0.9	-0.18					
		h a 2 h					-0.5	-0.18					
	≥ 1.0	> 2 h					-0.3	-0.18					
		0 a h/2					-1.3**	-0.18			≤ 10	1	
		> h/2					-0.7	-0.18			25	0.9	
											≥ 100	0.8	

Nota. De Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021.

Presión Neta

Para edificios rígidos cerrados y parcialmente cerrados, la presión neta sobre la estructura se determina mediante la siguiente ecuación:

$$p = q(z)[(GC_p) - (GC_{pi})] \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

p : presión total sobre el elemento.

$q(z)$: presión del viento.

C_p : coeficiente de factor externo.

G : coeficiente de ráfaga para edificaciones rígidas.

GC_{pi} : coeficiente de presión interna.

En el anexo B de los “Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica”, establece que los edificios bajos pueden ser considerados como edificios rígidos, cuyo valor de G es de 0.85.

12. Combinación de cargas

De acuerdo a lo establecido en el CSCR-2010 y en los Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, las combinaciones de cargas a utilizar para el diseño de esta investigación son las siguientes:

$$CU1 = 1.4CP \quad \text{Ecuación 47}$$

$$CU2 = 1.2CP + 1.6CT + 0.5CV \quad \text{Ecuación 48}$$

$$CU3 = 1.2CP + 0.5CT + CV \quad \text{Ecuación 49}$$

$$CU4 = 0.9CP + CV \quad \text{Ecuación 50}$$

CAPÍTULO III

Marco Metodológico

1. Definición del enfoque y método de investigación

1.1. Enfoque de la investigación

De acuerdo a las metodologías de investigación y según la clasificación del enfoque, la presente investigación se cataloga como cuantitativa según Fernández et al.,(2014) “El enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías.” p.4, en vista que se diseñará y analizará una estructura para techo basada en la siguiente normativa: el CSCR-2010, el AISC 360-16, Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, International Building Code 2018 (IBC) y el ADM 2010, y posteriormente se medirán esos valores para determinar su comportamiento.

1.2. Método de investigación

Este trabajo presenta una metodología correlacional-analítica, por lo tanto, se indica que:

Los estudios correlacionales tienen como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. En ocasiones sólo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables. Para evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, en los estudios correlacionales primero se mide cada una de éstas, y después se cuantifican, analizan y establecen las vinculaciones (Fernández et al., 2014, p.93).

Es metodología correlacional dado a que se va a determinar el comportamiento de una estructura de techo tanto en material de aluminio como en acero. Por otra parte, se considera que es de corte analítica porque una vez realizado el diseño, se debe analizar los resultados obtenidos mediante el software SAP2000 y verificados por los cálculos manuales de acuerdo a las normativas correspondientes, para determinar el comportamiento y la capacidad de resistencia estructural de

los materiales (acero/aluminio) y poder compararlos ante las variantes de claros, altura, peso y mantenimiento de la estructura.

2. Fuentes de Información

Las principales fuentes de información a utilizar para este trabajo de investigación serán las siguientes:

- Código Sísmico de Costa Rica -2010 (CSCR-2010).
- American Institute of Steel Construction (AISC 360-16).
- Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica, 2021.
- International Building Code 2018 (IBC-2018).
- Manual de Diseño de Aluminio 2010 (ADM-2010).
- Ejemplos del Manual de Diseño de Aluminio 2020 (revisión publica).

3. Definición de variables

Las siguientes variables son consideradas como de mayor relevancia para este trabajo de investigación:

Tabla 2*Matriz de variables*

Variable	Definición conceptual	Definición operativa
Tamaño de luz vano	Se define como luz o vano al espacio de una estructura porticada que queda abierta entre apoyos y vigas.	Solicitar a proveedores nacionales los catálogos de los perfiles disponibles en el mercado para proceder a realizar el diseño y análisis estructural, una vez obtenidos los datos se podrá definir cuál es ese tamaño máximo de luz para la construcción de un techo en aluminio.
Tipo de material	En ingeniería se conoce como material a aquel elemento que ha sufrido transformaciones mediante procesos físicos y/o químicos con el fin de fabricar un producto para la construcción, el cual tiene propiedades físicas y mecánicas que está en función tanto de su principal componente como de su proceso de fabricación.	Se recurrirá a las normas de diseño tanto de acero como de aluminio para determinar esas características físico- mecánicas de estos materiales. También se solicitará a proveedores nacionales las especificaciones tanto del acero, como del aluminio que se comercializa en nuestro país.
Tipo perfil	Los perfiles son piezas que tienen diferentes dimensiones, formas, espesores, peso y se pueden encontrar en el mercado de diferente material como aluminio y acero. Los perfiles sirven para crear el soporte o el “esqueleto” de cualquier estructura.	Para la selección de los perfiles se deberá conocer en cada caso de diseño cual será esa área mínima requerida. Los perfiles variaran de acuerdo al tamaño de la estructura, se espera que a mayores claros mayor sea el tamaño del perfil. Cuando el diseño cumpla todos sus estados límites se conocerá el tamaño de perfil para cada dimensión de bodega establecida tanto para el acero como para el aluminio.

Nota. Elaborado por la autora.

4. Instrumentos y técnicas utilizadas en la recolección de los datos

A continuación, se describen los principales instrumentos y técnicas utilizados para la recolección de datos:

Del CSCR-2010 se tomará principalmente la información para definir tanto las cargas como las combinaciones de cargas, para obtener la carga última de diseño (capítulo 6).

Se utilizará la metodología LRFD para el diseño de la estructura tanto en el material de aluminio como en acero, por ser la metodología más usada en nuestro país y que genera más confiabilidad por sus factores asociados al tipo de carga y tipo de resistencia.

Para el diseño de resistencia nominal de los elementos donde se calculará la capacidad a tensión, compresión, flexión y cortante, se utilizará las ecuaciones del AISC 360-16 para el caso del acero y el ADM para el caso del aluminio.

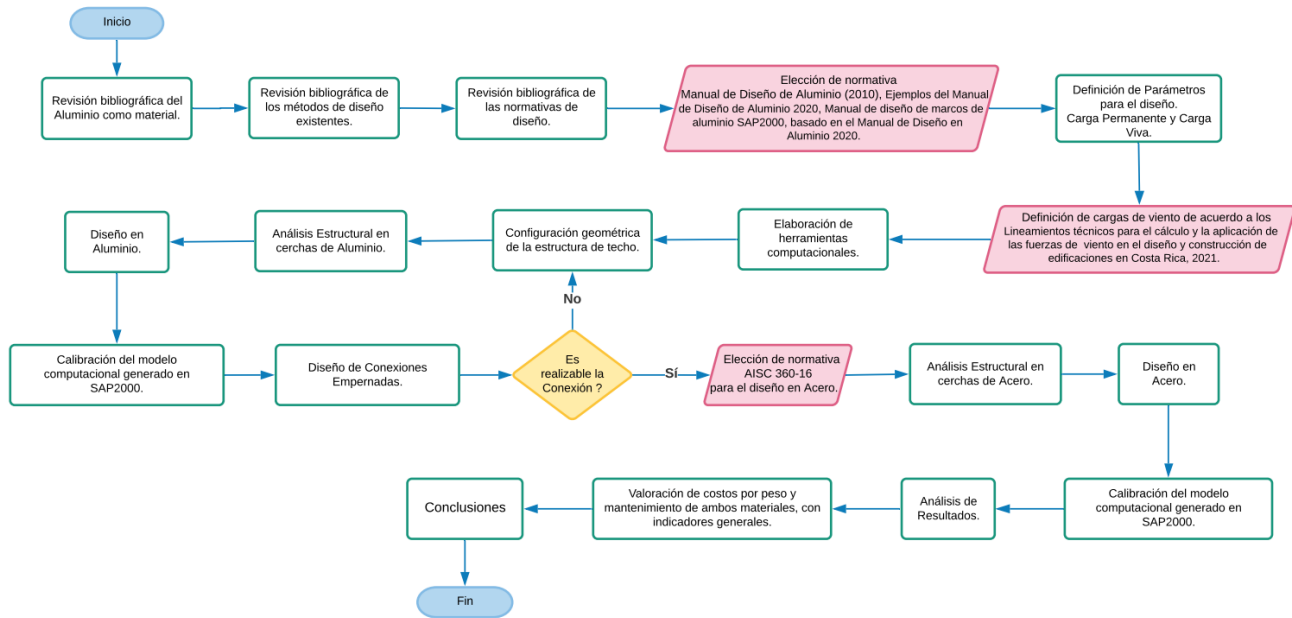
Se hará uso del asistente matemático Excel, para realizar la comprobación del diseño (verificar los cumplimientos de los estados límites) y validar la confiabilidad del software.

Para el diseño y análisis de la estructura de techo se utilizará la metodología de rigidez directa, que consiste en un método matricial que relaciona la rigidez de los elementos para resolver fuerzas y desplazamientos, combinado con la metodología del elemento finito que aproxima el comportamiento tanto del material como de la estructura ante ciertas cargas específicas, haciendo uso del software SAP2000.

El siguiente diagrama de flujo ilustra el procedimiento técnico ingenieril para la realización de esta investigación.

Figura 11

Diagrama de flujo para el trabajo de investigación



Nota. Elaborado por la autora.

5. Sustentación de la confiabilidad y validez de los instrumentos de la investigación

Los instrumentos utilizados para la recopilación de datos para esta investigación son confiables, al menos el CSCR-2010 ha sido utilizado con éxito por años en nuestro país, el AISC ha sido utilizado por cientos de miles de ingenieros alrededor del mundo para el diseño de estructuras metálicas, el ADM a pesar de que es una normativa muy reciente tiene más de dos décadas de ser utilizada en la industria de la ingeniería estructural.

Por otra parte, el SAP2000 ha sido una herramienta utilizada para diseñar miles de estructuras, basado en modelos matemáticos, algunos de los resultados arrojados por esta herramienta se comprobarán de manera manual y se verificará los resultados con el cumplimiento de las normas de diseño mencionadas anteriormente.

CAPÍTULO IV

Análisis de los datos

Nuestro país no cuenta con normativa para el diseño en aluminio, por lo tanto, se recurrió a códigos internacionales, sin embargo, estas normativas tienen un costo de adquisición. Por otra parte, el acceso libre que existe a estas normativas o a los estudios existentes que hacen referencia a ellas se encuentran desactualizadas.

Como principales códigos para el diseño de aluminio se tienen los siguientes:

- Manual de Diseño de Aluminio.
- Eurocódigo 9, Diseño de estructuras de aluminio.

La Asociación del Aluminio ha creado una norma estadounidense para el diseño de estructuras y conexiones en aluminio llamada “*Manual de Diseño de aluminio*”, este manual es actualizado cada 5 años y su más reciente actualización es la 2020. Por otra parte, el Comité Europeo de Normalización (CEN) ha creado una norma europea llamada *Eurocódigo 9*, es un manual de diseño para estructuras en aluminio.

Cabe señalar que el software SAP2000 en sus nuevas actualizaciones contiene un módulo de diseño en aluminio basada en la normativa del ADM, mientras que el software Dlubal posee un módulo de diseño en aluminio tanto con la normativa ADM como también con la del Eurocódigo 9.

En cuanto a métodos de diseño, no hay experiencia en el país ni tropicalización de los sistemas, así como también ciertos productos no se encuentran en el mercado y algunas de las principales prácticas constructivas en aluminio no son habituales en nuestro país, o existe cierta carencia de mano de obra especializada.

En Costa Rica se ha dado por años la adaptación de códigos internacionales en especial las normativas americanas, razón por la cual se eligió realizar este estudio basado en la normativa del Manual de Diseño de Aluminio. Cabe reiterar que en la adaptación de normativas internacionales siempre se generan ciertos tipos de problemas al tratar de adaptarlos, ya sea por la carencia de algunos materiales o por la adaptación de los métodos.

En la búsqueda para determinar los tamaños de techo que se puedan construir con los perfiles disponibles en el mercado nacional, se definirá a continuación una serie de datos para el diseño, además el lugar propuesto para este análisis es la gran área metropolitana.

1. Datos para el diseño

1.1. Geometría y tamaño

Debido a la geometría, al tamaño y por razones constructivas se diseñará para un ancho tributario de 5 metros, seguidamente se muestra las dimensiones de las estructuras propuestas:

- Techo #1: Tiene un ancho de 10 metros y un largo de 20 metros.
- Techo #2: Tiene un ancho de 15 metros y un largo de 30 metros.
- Techo #3: Tiene un ancho de 20 metros y un largo de 40 metros.
- Techo #4: Tiene un ancho de 25 metros y un largo de 50 metros.

1.2. Cargas

A continuación, se mostrará los valores determinados para la asignación de cargas sobre las estructuras para su respectivo diseño.

Carga temporal

Como carga temporal se tiene la estipulada por el Código Sísmico de Costa Rica en la Tabla 6.1 para el caso de:

- Techos 40 kg/m^2

Carga permanente

Las siguientes cargas son consideradas permanentes en el diseño y sus valores de peso son los siguientes:

- Cubierta rectangular calibre #26 10 kg/m²
- Instalaciones electromecánicas 10 kg/m²
- Cielos 25 kg/m²
- Clavadores o largueros 10 kg/m²

Para el caso del aluminio se asumirá un peso de 4 kg/m² para los clavadores, dado a que el aluminio es aproximadamente 1/3 más liviano que el acero.

Cargas por viento

Seguidamente se muestra los datos utilizados para el cálculo de las fuerzas de viento sobre la estructura y posteriormente se muestra la presión neta de viento por kg/m², esta carga va distribuida ya sea transversalmente o longitudinal a una distancia que va desde 0 hasta mayor a 2h, donde h es igual a 6 metros. Por otra parte, se menciona que la propuesta es de analizar la estructura a una altura que varía de 4 a 6 metros, sin embargo, considerando los resultados se determina diseñar para la carga de viento más crítica que se da a mayor altura, es así como la altura para diseño será de 6 metros.

Figura 12

Datos para el cálculo de fuerzas de diseño por viento sobre la estructura

Ubicación	Gran Área Metropolitana	
Categoría de Diseño	III Normal	
Factor de Exposición	C	
Tr	50	años
z	6	m
θ	9.65	grados
V_b	115	km/h
L	10-15-20-25	m
B	20-30-40-50	m

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 13

Cargas de diseño para techo #1- Sentido Transversal

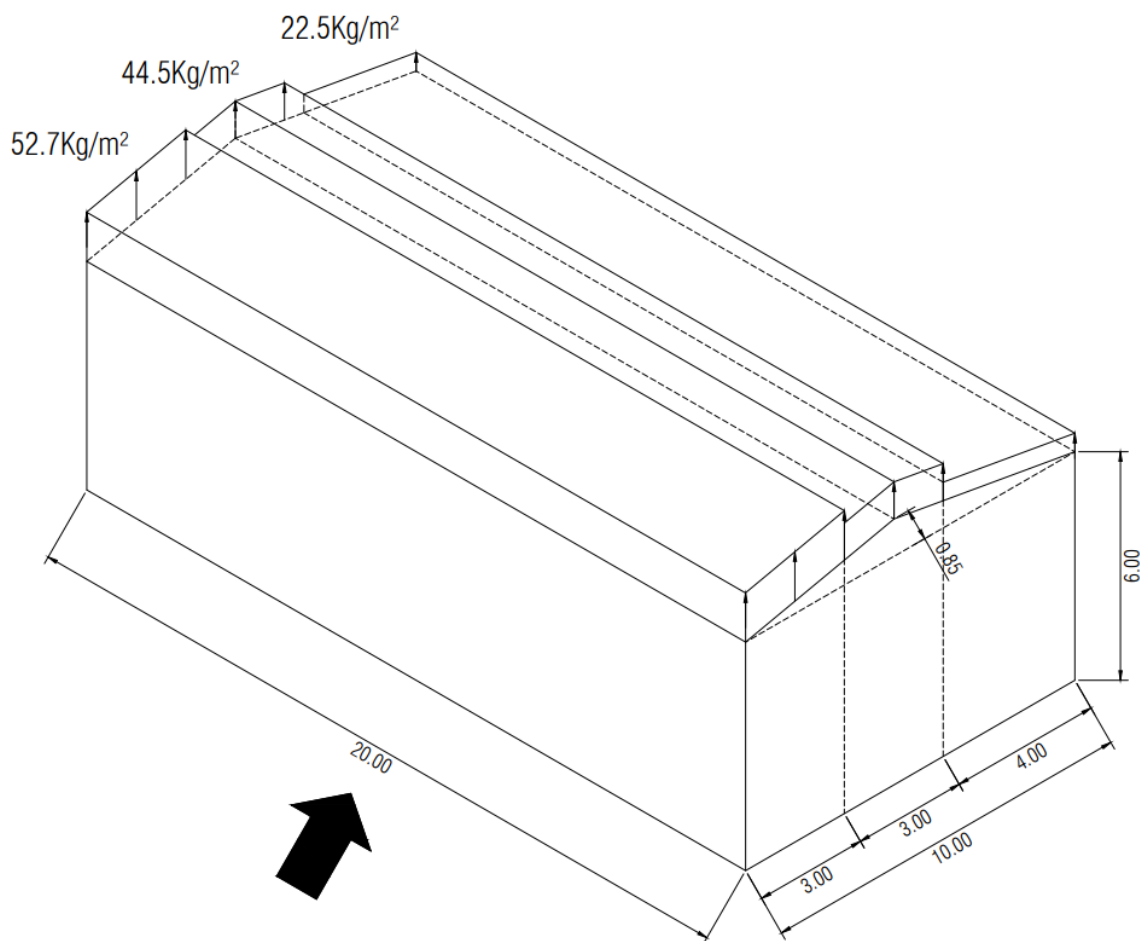
Sentido Transversal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
De 0 a h/2	80.7	0.85	-0.98	-52.7	-81.7
3	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
De h/2 a h	80.7	0.85	-0.86	-44.5	-73.5
6	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
De h a 2 h	80.7	0.85	-0.54	-22.5	-51.6
12	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
Mayor a 2 h	80.7	0.85	-0.38	-11.5	-40.6
	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9

Nota. Elaborado por la autora.

La siguiente figura muestra la distribución de la carga de viento sobre la estructura, de acuerdo a los datos resaltados en amarillo en la imagen anterior, así como su dirección.

Figura 14

Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido transversal ($-GC_{pi}$)

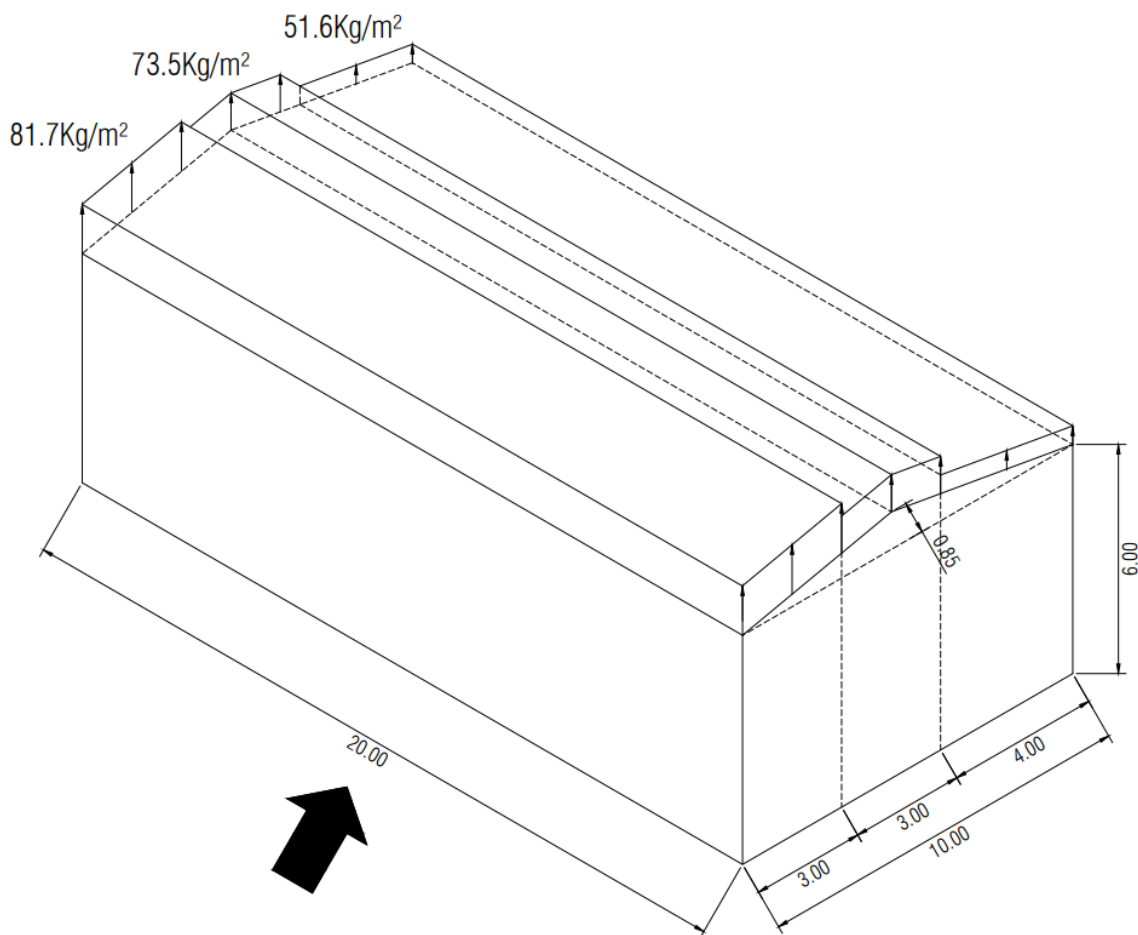


Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

La siguiente figura muestra la distribución de la carga de viento sobre la estructura, de acuerdo a los datos resaltados en color celeste en la Figura 13 y en el sentido transversal.

Figura 15

Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido transversal (+GC_{pi})



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 16

Cargas de diseño para techo #1- Sentido Longitudinal

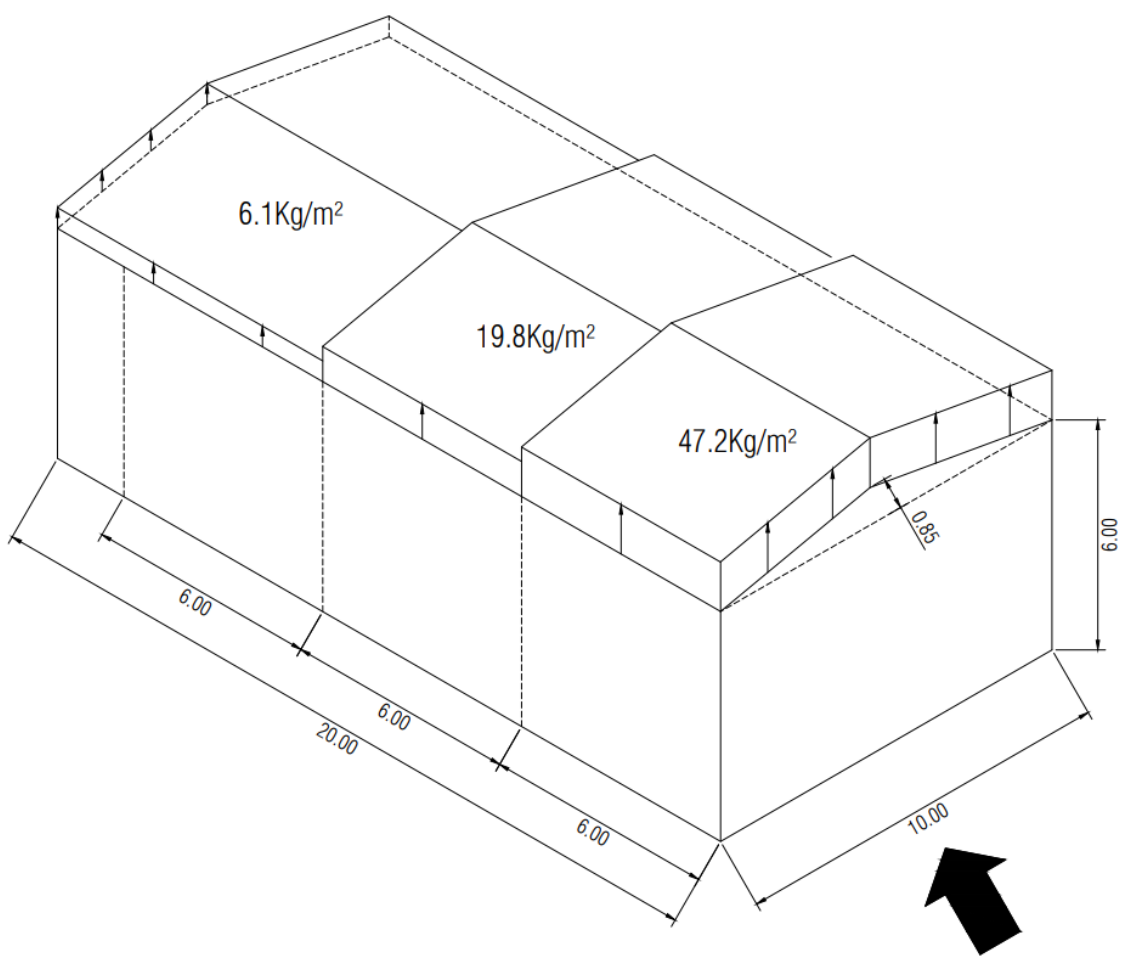
Sentido Longitudinal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
Hasta h	80.7	0.85	-0.9	-47.2	-76.3
6	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
De h a 2 h	80.7	0.85	-0.5	-19.8	-48.8
12	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
Mayor a 2 h	80.7	0.85	-0.3	-6.1	-35.1
	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9

Nota. Elaborado por la autora.

Seguidamente se muestra la distribución de la carga de viento sobre la estructura en el sentido longitudinal, cuyos datos corresponden a los sombreados en color amarillo del cuadro anterior.

Figura 17

Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido longitudinal (-GCpi)

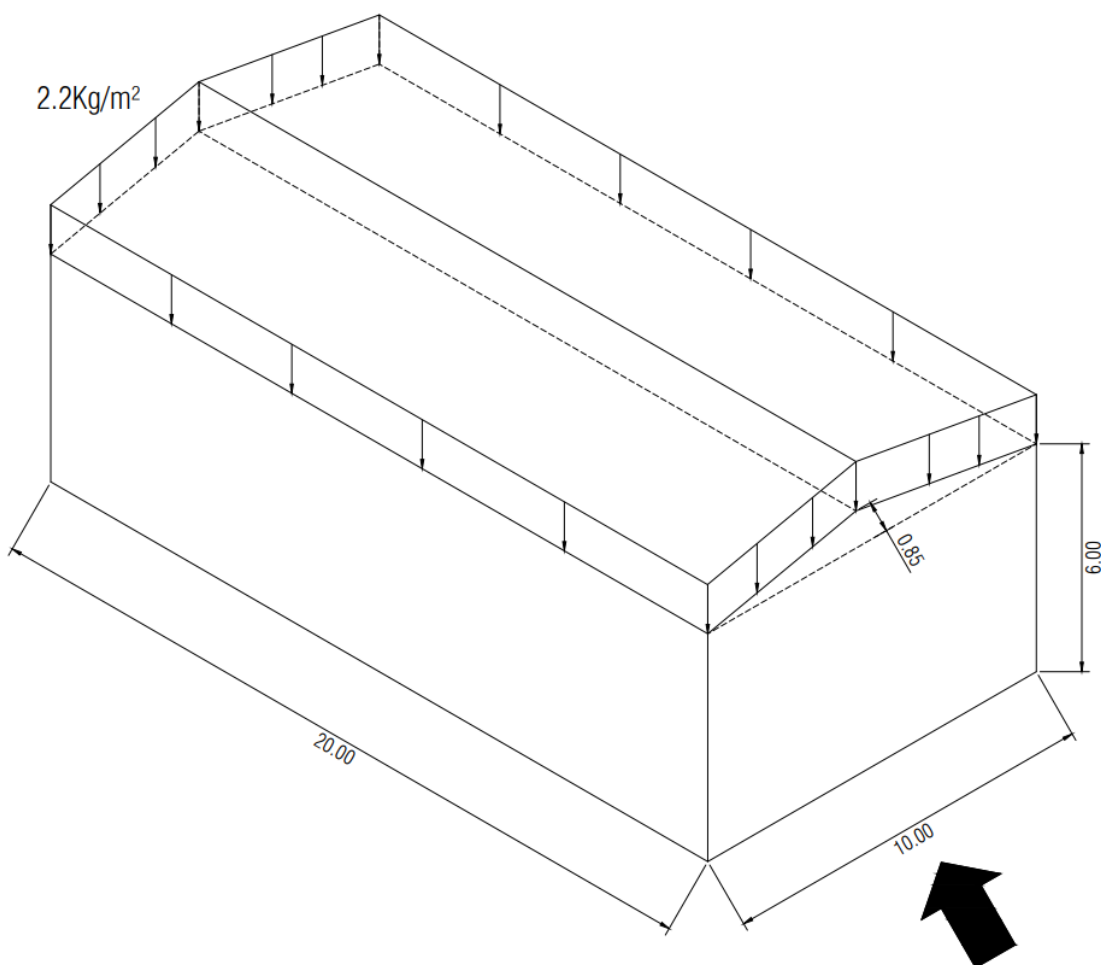


Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

En la siguiente imagen se muestra la distribución de carga de viento sobre la estructura, de acuerdo a los datos sombreados en color celeste en la Figura 16 en su sentido longitudinal.

Figura 18

Cargas de viento para la estructura de techo #1 en el sentido longitudinal (-GCpi)



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 19

Cargas de diseño para techo #2, #3 y #4 - Sentido Transversal

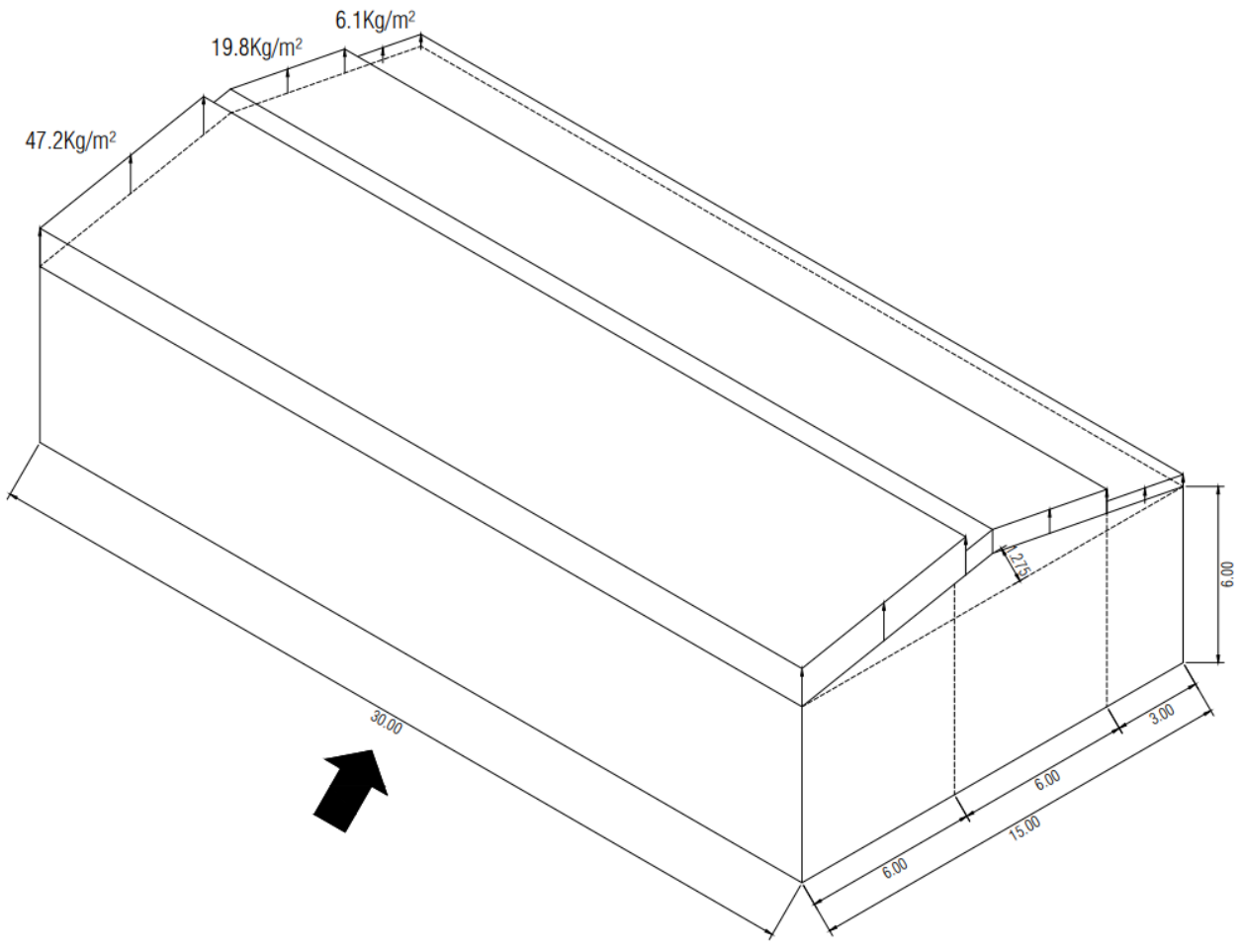
Sentido Transversal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
Hasta h	80.7	0.85	-0.9	-47.2	-76.3
6	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
De h a 2 h	80.7	0.85	-0.5	-19.8	-48.8
12	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
Mayor a 2 h	80.7	0.85	-0.3	-6.1	-35.1
	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9

Nota. Elaborado por la autora.

Seguidamente se muestra la aplicación de la carga de viento sobre la estructura de techo #2, de acuerdo a los datos sombreados anteriormente en color verde. Posteriormente se muestra la distribución de carga sobre la estructura, de acuerdo a los datos sombreados en color morado, para el caso de +GC_{pi}, sobre la estructura de techo #4.

Figura 20

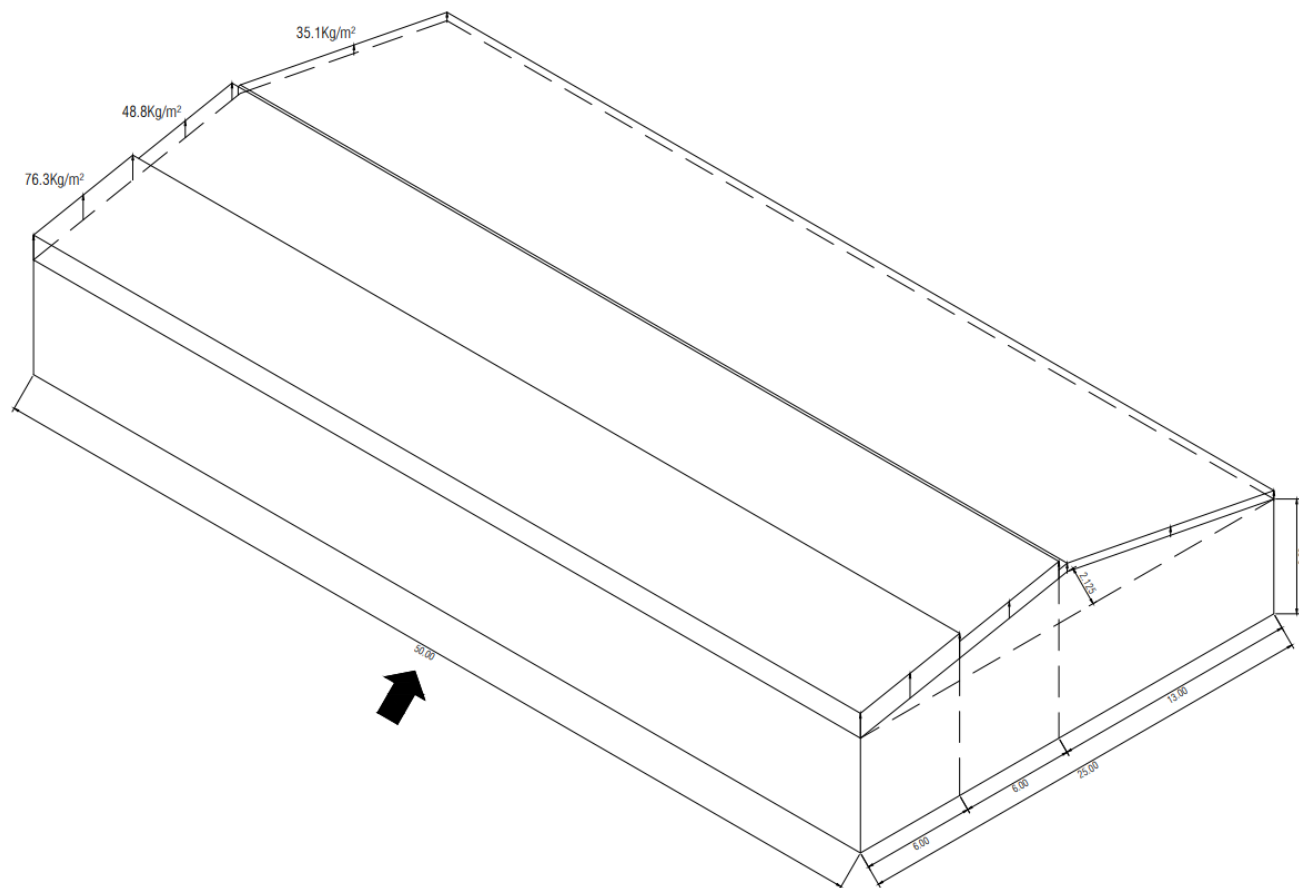
Cargas de viento para la estructura de techo #2 en el sentido transversal (-GCpi)



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 21

Cargas de viento para la estructura de techo #4 en el sentido transversal (+GCpi)



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 22

Cargas de diseño para techo #2, #3 y #4 - Sentido Longitudinal

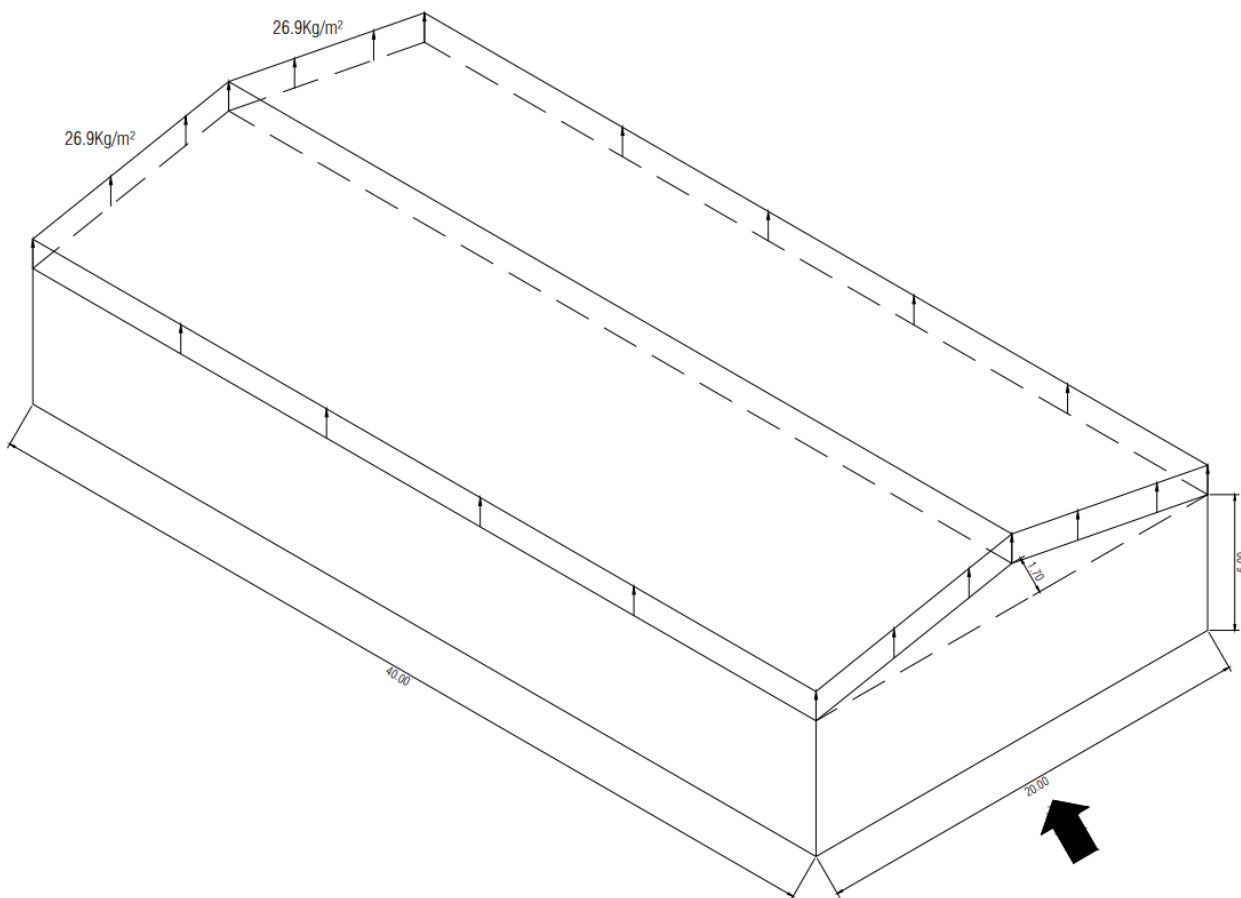
Sentido Longitudinal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
Hasta h	80.7	0.85	-0.9	-47.2	-76.3
1	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
De h a 2 h	80.7	0.85	-0.5	-19.8	-48.8
2	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9
Mayor a 2 h	80.7	0.85	-0.3	-6.1	-35.1
	80.7	0.85	-0.18	2.2	-26.9

Nota. Elaborado por la autora.

En seguida se muestra la carga de viento en el sentido longitudinal y su distribución sobre la estructura de techo #3, los datos corresponden a los sombreados en color amarillo en el cuadro anterior. Así como también se muestra la distribución de carga sobre la estructura de techo #4, cuyos datos están sombreados en color celeste.

Figura 23

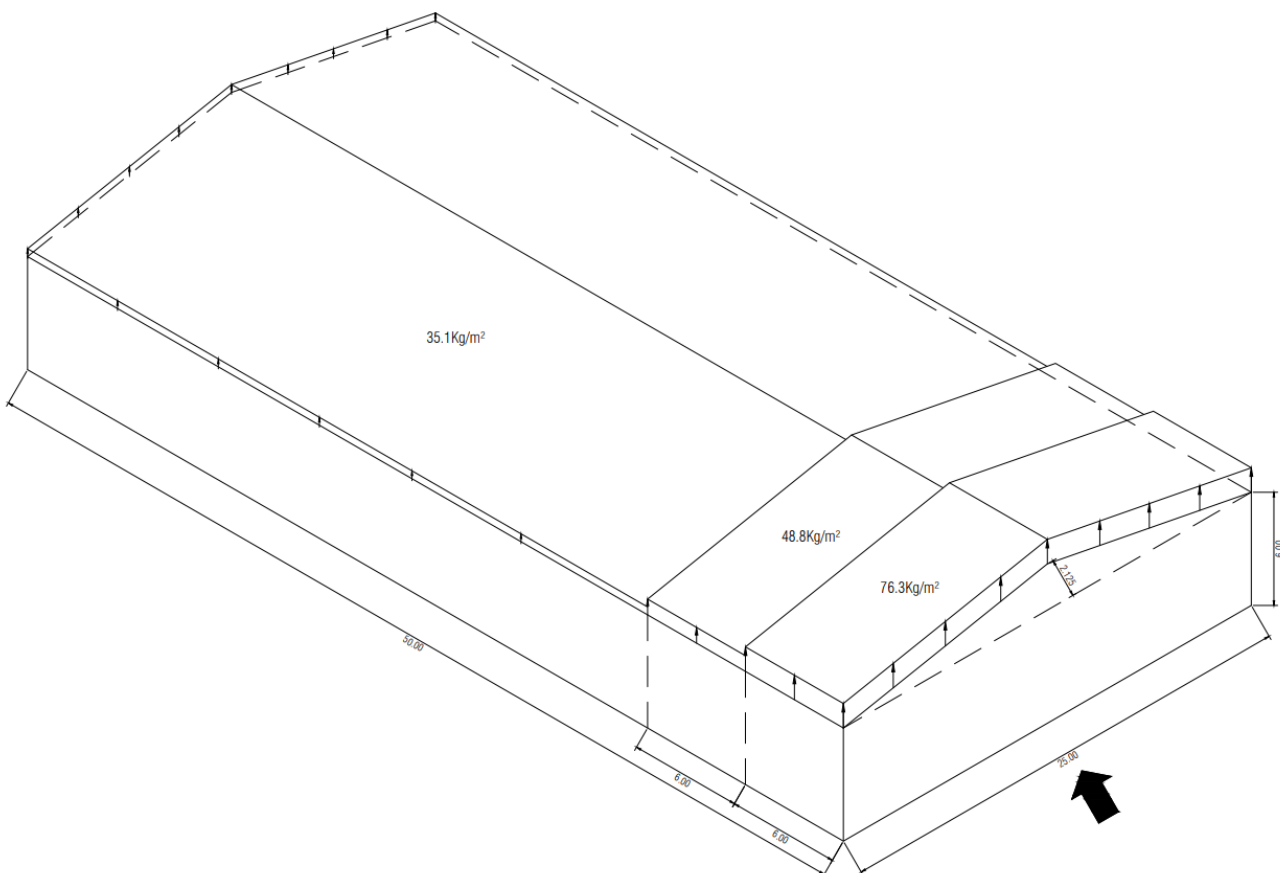
Cargas de viento para la estructura de techo #3 en el sentido longitudinal (+GCpi)



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 24

Cargas de viento para la estructura de techo #4 en el sentido longitudinal (+GCpi)



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Cargas por viento para condiciones de servicio

Figura 25

Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #1- Sentido Transversal

Sentido Transversal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
De 0 a h/2	35.6	0.85	-0.98	-23.2	-36.0
3	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
De h/2 a h	35.6	0.85	-0.86	-19.6	-32.4
6	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
De h a 2 h	35.6	0.85	-0.54	-9.9	-22.7
12	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
Mayor a 2 h	35.6	0.85	-0.38	-5.1	-17.9
	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 26

Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #1- Sentido Longitudinal

Sentido Longitudinal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
Hasta h	35.6	0.85	-0.9	-20.8	-33.6
1	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
De h a 2 h	35.6	0.85	-0.5	-8.7	-21.5
2	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
Mayor a 2 h	35.6	0.85	-0.3	-2.7	-15.5
	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 27

Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #2, #3 y #4 - Sentido Transversal

Sentido Transversal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
Hasta h	35.6	0.85	-0.9	-20.8	-33.6
6	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
De h a 2 h	35.6	0.85	-0.5	-8.7	-21.5
12	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
Mayor a 2 h	35.6	0.85	-0.3	-2.7	-15.5
	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 28

Cargas de diseño para condiciones de servicio para techo #2, #3 y #4 - Sentido Longitudinal

Sentido Longitudinal					
Superficie	q	G	C _p	Presión neta (kg/m ²)	
	(kg/m ²)			-GC _{pi}	+GC _{pi}
Techo					
Hasta h	35.6	0.85	-0.9	-20.8	-33.6
1	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
De h a 2 h	35.6	0.85	-0.5	-8.7	-21.5
2	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8
Mayor a 2 h	35.6	0.85	-0.3	-2.7	-15.5
	35.6	0.85	-0.18	1.0	-11.8

Nota. Elaborado por la autora.

2. Resultados obtenidos

Una vez definidas las cargas para el diseño se procede a definir el modelo para la estructura de techo.

Es muy común observar en nuestro país que en su mayoría cuando las estructuras presentan un claro de un tamaño considerable se suelen resolver mediante la construcción de cerchas en acero y con perfiles rectangulares principalmente, dado a que algunos factores socioculturales afectan las soluciones de diseño de las obras, y en nuestro caso los principales factores son la mano de obra y los materiales.

Tras una extensa búsqueda en la literatura, obteniendo resultados mínimos sobre la solución a las estructuras de aluminio para techo, una revisión en las practicas constructivas de los materiales de acero y de aluminio y además de verificar los catálogos nacionales de aluminio para determinar la perfilería disponible, se llega a un acuerdo en consenso entre tutor y estudiante de resolver la estructura por medio de cerchas, elaboradas con perfiles rectangulares para ambos materiales con el fin de facilitar las conexiones, donde las conexiones se resolverán de acuerdo a las principales practicas constructivas de cada material, es así como la estructura en acero será analizada asumiendo uniones soldadas y para el caso del aluminio se diseñarán sus conexiones empernadas, esta decisión de realizar las conexiones de aluminio empernadas se da por la principal causa de que la resistencia en el aluminio se ve reducida considerablemente al someter los elementos al calor y la otra es el costo de la soldadura en aluminio la cual requiere equipo técnico de alto costo, como también la escases de mano de obra especializada en esta técnica, todas estas decisiones fueron analizadas claramente con el principal fin de presentar un diseño que se adapte tanto a las prácticas constructivas de nuestro país, como a que pueda ser una obra ejecutable.

Analizado lo establecido en el capítulo J del ADM, valorando el diseño del puente de 65 metros en aluminio ubicado en el puerto comercial de Ajaccio, construido y diseñado por la empresa Poralu Bridge y la figura 2.3 del libro *Aluminum Structures*; la conexión será diseñada como conexión por aplastamiento tipo sándwich donde se utilizarán placas de acero A36 y pernos A325 o A307 de acuerdo a los requerimientos en el diseño. Los pernos deben ser galvanizados y

las placas de acero deben poseer un adecuado recubrimiento para evitar fallas por corrosión galvánica.

Figura 29

Puente en aluminio construido por Poralu Marine, Ajaccio



Nota. Por Poralu Marine, tomado de <https://www.poralu.com/en/a-world-record-for-a-65-m-aluminium-bridge-constructed-by-poralu-marine-2/>

Figura 30

Estructura en aluminio unida mediante conexiones mecánicas



Nota. De Aluminum Structures, por Kinssell y Ferry, 2002.

2.1. Análisis estructural

Al obtener las cargas últimas de diseño para las cerchas del techo #1 y verificar primeramente el diseño en aluminio de acuerdo a la normativa del ADM, se determina que existen dos tipos de perfiles para resolver este diseño.

Tabla 3

Datos de perfiles de aluminio para diseño

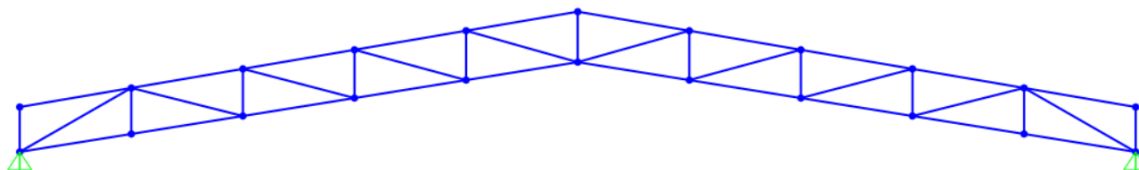
Perfil	b (mm)	d (mm)	e (mm)
1	45	102	3.3
2	76	165	9.9

Nota. Elaborado por la autora.

En uno de los primeros intentos solo se logra realizar el diseño con el perfil dos, sin embargo, este perfil por su tamaño presentaba una relación de demanda capacidad muy bajo por lo tanto generaba un sobre diseño en la estructura, se sigue en el intento de buscar una configuración en la cercha tal que se pueda diseñar con el perfil 1, dando como resultado la siguiente geometría y distribución en la cercha, permitiendo realizar un diseño optimizado. La configuración geométrica definida para las otras estructuras de techo se puede observar en las Figuras 60, 62 y 64.

Figura 31

Geometría de diseño para estructura de cercha del techo #1



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

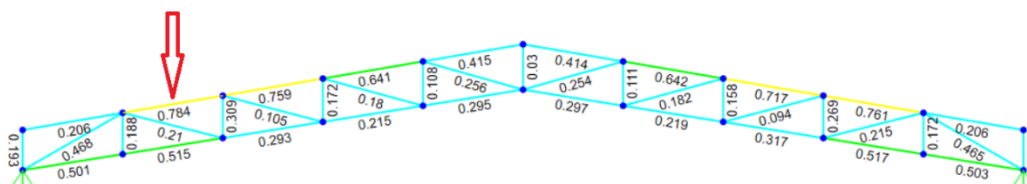
Se observó dentro del análisis y diseño la variación de la resistencia en la cercha de acuerdo a su configuración, para algunos casos se cambió de dirección algunos arriostres con el fin de ganar

resistencia, mientras que en otros casos se modificó la configuración para facilitar el diseño de las conexiones empernadas.

Seguidamente se muestra los datos utilizados para el diseño, así como también los resultados del diseño obtenidos para el elemento señalado en la siguiente figura.

Figura 32

Demanda capacidad de elementos en la cuerda superior de la cercha



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Tabla 4

Propiedades mecánicas de la Aleación 6063-T6

Aleación	AA 6063 T6	
F_{ty}	25	ksi
F_{cy}	25	ksi
F_{tu}	30	ksi
F_{sy}	15	ksi
F_{su}	18	ksi
E	10100	ksi
K_t	1	
G	3800	

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 33

Longitud máxima del perfil y carga ultima de diseño para techo #1

Longitud	1.01	m
Pu	5.67	Ton

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 5

Resistencia de diseño para perfil 1

PERFIL 1 - AA 6063-T6	
Resistencia a Tensión	13.49 Ton
Resistencia a Compresión	10.39 Ton
Resistencia a Flexión	0.42 Ton
Resistencia a Cortante	5.95 Ton

Nota. Elaborado por la autora.

Los cálculos anteriores demuestran que la capacidad del elemento es mayor que la demanda solicitada, por lo tanto, se tiene un diseño satisfactorio.

Calibración entre los cálculos manuales y los cálculos obtenidos mediante SAP2000 para el diseño en Aluminio

Tomando como referencia el elemento señalado en la Figura 32 y los cálculos demostrados anteriormente, se busca en esta sección demostrar la calibración realizada entre los datos determinados por el software y los datos obtenidos mediante los cálculos manuales.

La siguiente imagen muestra los valores obtenidos por el software para el diseño, cabe destacar que esos valores hacen referencia a la limitante de diseño según cada caso al igual que los datos presentados en la Tabla 5.

Figura 34

Valores de diseño determinados por SAP2000 para la estructura de techo #1 en aluminio.

	Combo	P	M33	M22	V2	V3
DEMANDS	CU2-2	-5.67	-0.105	0.	-0.423	0.
CAPACITIES		10.44	0.436	0.242	5.954	2.375
DEMAND/CAPACITY		0.543	0.241	0.	0.071	0.

Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Comparando los resultados de la Tabla 5, con los resultados contenidos en la Figura 34, se dice que hay una buena correlación entre los datos, todos los parámetros dan parecido, es así como a partir de este punto el proceso se automatiza con el programa, sin embargo, en el Anexo 1 se muestra la memoria de cálculo para el diseño de todas las estructuras de techo en aluminio analizadas en esta investigación, donde se eligió uno de los casos más críticos presentes en la cuerda superior, cuerda inferior y arriostres.

Algunas de las diferencias mínimas que se presentan entre los cálculos manuales y los cálculos del programa para el caso del aluminio, se debe a ciertos factores que se mencionan en seguida:

- Los valores de las constantes de pandeo que utiliza el software poseen diferencias mínimas respecto a las tomadas del manual ADM 2010.
- El programa asume un valor de C_b que no siempre es 1, sin embargo, en los cálculos manuales se recomienda usar $C_b = 1$ conservadoramente.
- En los cálculos manuales para el estado límite de tensión en el miembro, se toma en cuenta los agujeros de los pernos mientras que el software no interpreta este dato.

A continuación, se muestran una serie de tablas con los datos utilizados para el diseño de la cercha en acero, de manera similar como se mostró en el caso anterior.

Tabla 6

Propiedades mecánicas del acero ASTM A653

Designación	ASTM A653	
F _{ty}	33	ksi
F _{tu}	45	ksi
E	29000	ksi
K	1	
G	11197	

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 7

Datos de perfiles en acero para diseño

Perfil	b (mm)	d (mm)	e (mm)	Uso
RT13 48-96-2.38	48	96	2.38	Cuerda Superior
RT16 100-150-1.8	100	150	1.8	Cuerda Inferior
RT5 48-72-1.5	48	72	1.5	Arriostres

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 8

Resistencia de diseño para perfiles en acero

PERFIL LAMINADO EN FRIO A653			
	Resistencia a Tensión	Resistencia a Compresión	Resistencia a Flexión
RT13 48-96-2.38	13.84 Ton	9.93 Ton	0.43 Ton
RT16 100-150-1.8	18.5 Ton	8.2 Ton	0.74 Ton
RT5 48-72-1.5	7.3 Ton	6.2 Ton	0.18 Ton

Nota. Elaborado por la autora.

Para esta ocasión la demanda en la cuerda superior es de 6.25 Ton, por lo tanto, de acuerdo a la tabla anterior se tienen que el diseño es satisfactorio.

Calibración entre cálculos manuales y los cálculos obtenidos mediante SAP2000 para el diseño en Acero

La cercha en acero ha sido diseñada con la misma geometría que se realizó para el material de aluminio, la variante es el asumir las conexiones soldadas, así como el tipo de material y sus propiedades mecánicas.

La siguiente figura muestra los datos definidos por el programa para el diseño en acero.

Figura 35

Valores de diseño determinados por SAP2000 para la estructura de techo #1 en acero

Axial	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity	
	-6.253	9.866	13.84	
Major Moment	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB	phi*Mn Cb=1
Minor Moment	0.	0.264	0.43	0.421

Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Comparando los datos de la figura anterior con los datos sombreados en la Tabla 8, se demuestra una muy buena correlación, donde los parámetros son casi iguales, por lo tanto, a partir de esta comprobación el proceso se automatiza con el programa.

2.2. Análisis de demanda capacidad para las estructuras propuestas

A continuación, se analizará los valores de demanda capacidad para la estructura de techo#1 en aluminio. De acuerdo a los datos presentados con anterioridad, la carga última (P_u) mencionada en la Figura 33, es para la cuerda superior en uno de sus casos más crítico, y en la Tabla 5 se muestra la resistencia a tensión y a compresión para el perfil, sin embargo, de estas dos cargas regirá en el diseño la menor de todas, es así como para determinar el valor de demanda

capacidad se divide la carga última de diseño entre la resistencia de diseño a compresión; seguidamente se muestra su cálculo:

$$\frac{D}{C} = \frac{5.67 \text{ Ton}}{10.39 \text{ Ton}}$$

$$\frac{D}{C} = 0.546$$

El cálculo anterior se realizó para el elemento señalado en la Figura 32, sin embargo, se puede observar que el resultado varió decimalmente con respecto a ese valor de demanda capacidad, este caso ocurre porque existe un valor de demanda capacidad relacionado a la flexión, al modelar el diseño asumiendo conexiones emperradas, estas flexiones son realmente pequeñas, por lo tanto, no afectan considerablemente el diseño.

La siguiente ecuación muestra el cálculo de demanda capacidad para la flexión presente en el elemento en análisis.

$$\frac{D}{C} = \frac{0.10 \text{ Ton} * m}{0.42 \text{ Ton} * m}$$

$$\frac{D}{C} = 0.238$$

Por lo tanto, la sumatoria de la demanda capacidad total en el elemento de aluminio es:

$$\sum D/C = 0.546 + 0.238$$

$$\sum D/C = 0.784$$

Realizando la comparación con lo señalado en la Figura 32, se puede observar que el dato obtenido (0,784) anteriormente es igual (0,784) al señalado en dicha figura.

Seguidamente, se mostrará el cálculo del valor de demanda capacidad de la cuerda superior para la cercha en acero, para el caso de tensión y compresión en el elemento:

$$\frac{D}{C} = \frac{6.25 \text{ Ton}}{9.93 \text{ Ton}}$$

$$\frac{D}{C} = 0.629$$

La siguiente ecuación estima el valor de demanda capacidad por la flexión presente en el elemento de acero:

$$\frac{D}{C} = \frac{0.049 \text{ Ton} * m}{0.43 \text{ Ton} * m}$$

$$\frac{D}{C} = 0.114$$

Cabe mencionar que en el manual AISC 360-16, en el capítulo H, sección H1-1a, establece una condición para cuando los valores de demanda capacidad de la carga axial son mayores a 0.2 y es la siguiente:

Figura 36

Normativa para el cálculo de demanda capacidad en acero.

(a) Cuando $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (\text{H1-1a})$$

Nota. De Specification for Structural Steel Buildings, por American Institute of Steel Construction, 2016.

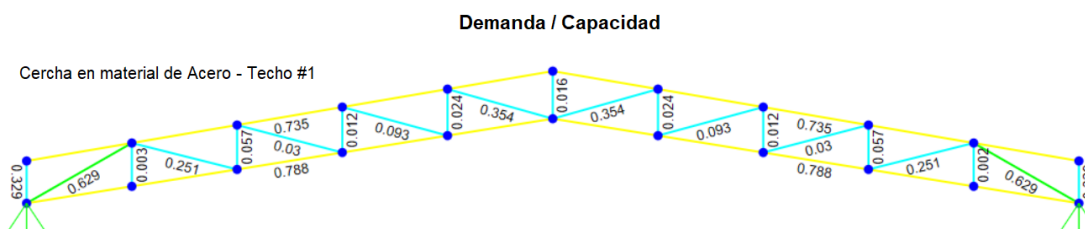
Por lo tanto, la resultante de demanda capacidad en la cuerda superior es de 0,731, donde existe una mínima variación en el resultado al compararlo con los datos de la siguiente figura.

$$\sum D/C = 0.629 + \frac{8}{9}(0.114)$$

$$\sum D/C = 0.731$$

Figura 37

Valores de demanda capacidad para el techo#1 en acero



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

En el análisis anterior, se observa la presencia de pequeños momentos en la cuerda superior, estos valores no son tan significativos porque la cercha se encuentra arriostrada tanto en el eje mayor como en el eje menor, en el eje mayor se encuentra arriostrada por los elementos de la cercha mientras que en el eje menor se encuentra arriostrada por los clavadores de techo.

De momento esto no es un dato significativo, sin embargo, al analizar la cuerda inferior se observa que estos momentos son realmente representativos en el diseño y deben ser verificados, la cuerda inferior se encuentra arriostrada en su eje mayor, pero en su eje menor no existe arriostamiento, típicamente las cuerdas de las cerchas soldadas se construyen continuas y esto genera momentos que deben ser valorados dentro del diseño. Especialmente en la cuerda inferior es donde radica la gran diferencia en el análisis, al asumir conexiones emperrada para una y conexiones soldadas para la otra estructura, sin embargo, anteriormente se justificó la razón por la cual se realizaría conexiones emperradas para el aluminio y conexiones soldadas para el acero.

Seguidamente se muestran unas tablas con los valores de demanda capacidad para el diseño de las estructuras propuestas, con el fin de comparar los diseños de acuerdo a la disponibilidad de materiales en el mercado nacional.

Tabla 9

Valores de demanda capacidad para techo #1

Techo # 1										
Material	Elemento		Longitud m	ϕP_n Ton	ϕM_{np} Ton	P_u Ton	M_u Ton	D/C P	D/C M	D/C Total
Acero	Cuerda Superior	RT13 48-96-2.38	5.07	9.87	0.43	6.25	0.05	0.63	0.11	0.735
	Cuerda Inferior	RT16 100-150-1.8	5.07	8.25	0.74	5.18	0.13	0.63	0.18	0.788
	Arriostre	RT5 48-72-1.5	1.15	6.24	0.18	3.91	0.00	0.63	0.00	0.629
Aluminio	Cuerda Superior	Perfil 1	1.01	10.44	0.44	5.67	0.11	0.54	0.24	0.784
	Cuerda Inferior	Perfil 1	1.01	10.45	0.44	4.02	0.06	0.38	0.13	0.516
	Arriostre	Perfil 1	1.15	9.67	0.42	4.11	0.02	0.43	0.04	0.468

Nota. Elaborado por la autora.

Este caso fue analizado anteriormente de forma parcial, pero ahora se analizará otros datos importantes dentro del diseño, de acuerdo a los datos de la tabla anterior se observa que para el diseño en acero se usaron tres tipos de perfil, pero para el caso del diseño en aluminio solo se logró utilizar un único tipo de perfil, las razones son las siguientes: en primera instancia el diseño de la conexión presento una limitación y el segundo caso se da por la escasez de perfilería existente en nuestro país.

Tabla 10

Valores de demanda capacidad para techo #2

Techo # 2										
Material	Elemento		Longitud m	ϕP_n Ton	ϕM_{np} Ton	P_u Ton	M_u Ton	D/C P	D/C M	D/C Total
Acero	Cuerda Superior	RT 25 100-150-4.75	7.61	45.95	2.42	14.13	1.54	0.31	0.64	0.874
	Cuerda Inferior	RT 26 100-200-4.75	15.00	3.46	3.74	0.80	2.24	0.23	0.60	0.765
	Arriostre	RT 9 48-96-1.5	2.00	5.32	0.28	1.86	0.00	0.35	0.00	0.353
Aluminio	Cuerda Superior	Perfil 2	7.61	51.70	3.07	7.37	1.05	0.14	0.34	0.483
	Cuerda Inferior	Perfil 2	1.00	60.89	3.33	6.14	1.03	0.10	0.31	0.411
	Arriostre	Perfil 2	2.00	43.84	3.23	2.27	0.06	0.05	0.02	0.069

Nota. Elaborado por la autora.

Para el diseño de la cercha en aluminio cuyo claro libre es de 15 metros solo se consigue realizar con el perfil 2; el perfil 1 y perfil 2 nombrados así en la Tabla 3 y cuyas características se encuentran allí mismo, son los perfiles de mayor tamaño encontrados en el mercado nacional, los cuales muestran una gran diferencia en cuanto a tamaño y espesor el uno del otro, por lo tanto, al no poseer más opciones se diseña con lo disponible. Al analizar los valores de demanda capacidad para la estructura de aluminio se observan valores muy pequeños lo que significa principalmente un sobre diseño en la estructura que consecuentemente incurrirá en altos costos.

Por otra parte, en el diseño en acero se observa que el perfil utilizado en la cuerda inferior es de mayor tamaño que el perfil utilizado en la cuerda superior, debido a que la demanda por flexión aumenta a medida que aumenta la longitud del elemento sin arriostamiento. También fue posible optimizar el diseño de los arriostres gracias a la variedad de perfilería en acero disponible en el mercado nacional.

Comparando los valores de demanda capacidad de maneral general para esta estructura, se muestra un debido abastecimiento de perfilería en acero y una escasez de perfilería en aluminio el cual genera un encarecimiento en el diseño.

Tabla 11

Valores de demanda capacidad para techo #3

Techo # 3										
Material	Elemento		Longitud m	ϕP_n Ton	ϕM_{np} Ton	P_u Ton	M_u Ton	D/C P	D/C M	D/C Total
Acero	Cuerda Superior	RT 26 100-200-4.75	10.14	54.33	3.75	20.06	2.24	0.37	0.60	0.899
	Cuerda Inferior	RT- AR 1 100-350-3.85	20.00	2.68	7.20	0.64	5.00	0.24	0.69	0.856
	Arriostre	RT 16 100-150-1.8	3.00	11.50	0.74	3.51	0.01	0.31	0.01	0.315
Aluminio	Cuerda Superior	Perfil 2	10.14	58.59	3.01	16.70	1.54	0.29	0.51	0.797
	Cuerda Inferior	Perfil 2	1.00	60.89	3.33	9.73	1.58	0.16	0.47	0.632
	Arriostre	Perfil 2	3.00	23.19	3.14	3.39	0.05	0.15	0.02	0.162

Nota. Elaborado por la autora.

La estructura de techo #3 posee un claro libre de 20 metros, para el caso del diseño en acero como no se poseía un perfil de mayor tamaño que satisficiera las condiciones de diseño, se optó por proponer una sección armada a partir de dos perfiles, esta práctica es utilizada en nuestro país

en algunos casos específicos donde no se posee un perfil con la resistencia requerida para el diseño, esta técnica consiste en unir las piezas mediante soldadura.

La pieza RT-AR 1 esta armada a partir de dos piezas, un perfil de 100 mm de ancho por 150 mm de alto y 3,17 mm de espesor, la otra pieza posee un ancho de 100 mm, una altura 200 mm y un espesor 3,17 mm, para poder introducir el dato en el software se realizó unas iteraciones hasta lograr equiparar el área de la sección creada con la suma de las áreas de ambos perfiles.

De acuerdo a la tabla anterior, los valores de demanda capacidad de las cuerdas en acero son mayores a 0,85 mientras que para el aluminio no supera un valor mayor a 0,8 por lo tanto una vez más se dice que el diseño en aluminio es costoso y el de acero satisface las necesidades de demanda capacidad. Si el aluminio no presentara la particularidad de que su resistencia se reduce al recibir calor, se podrían solucionar algunas necesidades con la técnica de secciones armadas a partir de perfiles existentes.

Tabla 12

Valores de demanda capacidad para techo #4

		Techo # 4								
Material	Elemento	Longitud m	ϕP_n Ton	ϕM_{np} Ton	P_u Ton	M_u Ton	D/C P	D/C M	D/C Total	
Acero	Cuerda Superior	RT 26 100-200-4.75	12.68	54.60	3.74	26.84	1.91	0.49	0.51	0.946
	Cuerda Inferior	RT-AR3 100-400-5.65	25.00	2.73	13.57	1.16	7.84	0.42	0.58	0.936
	Arriostre	RT 16 100-150-1.8	3.27	11.21	0.74	3.84	0.01	0.34	0.01	0.353
Aluminio	Cuerda Superior	Perfil 2	12.68	54.95	2.95	21.34	0.92	0.39	0.31	0.699
	Cuerda Inferior	Perfil 2	0.75	65.51	3.35	15.69	1.58	0.24	0.47	0.710
	Arriostre	Perfil 2	3.27	19.70	3.14	4.18	0.06	0.21	0.02	0.229

Nota. Elaborado por la autora.

Era de esperarse mayores valores de demanda capacidad en el aluminio para esta cercha que para la anterior, sin embargo, la variación de los resultados corresponde a la configuración de la cercha, la cual fue modificada por requerimientos de diseño en la conexión. Se observa que con este perfil 2 de aluminio, aún con un claro de 25 metros los niveles de demanda capacidad no son muy altos. Desde otro punto de vista el acero presenta niveles de demanda capacidad altos, sin embargo, estos valores se encuentran dentro del rango aceptable.

Para este diseño se propone otra sección armada la cual se encuentra detallada en la siguiente tabla, esta tabla muestra las características geométricas de los perfiles de acero utilizados para el diseño de las cerchas analizadas en esta investigación.

Tabla 13

Características geométricas de los perfiles utilizados en el diseño de acero

Perfil	b (mm)	d (mm)	e (mm)
RT5 48-72-1.5	48	72	1.5
RT 9 48-96-1.5	48	96	1.5
RT13 48-96-2.38	48	96	2.38
RT16 100-150-1.8	100	150	1.8
RT 25 100-150-4.75	100	150	4.75
RT 26 100-200-4.75	100	200	4.75
RT- AR 1 100-350-3.85	100	350	3.85
RT-AR3 100-400-5.65	100	400	5.65

Nota. Elaborado por la autora.

2.3. Diseño de conexiones

El diseño estructural es un proceso iterativo donde se debe revisar cada parte de la estructura para garantizar tanto la seguridad como la economía, con el fin de satisfacer las demandas requeridas. Las conexiones son parte del diseño y como parte del diseño en muchas ocasiones se tornan en limitantes que transforman el diseño en un proceso reiterado.

Las conexiones empernadas presentan un inconveniente en el proceso de diseño y es que estas requieren de mayor espacio para realizarlas, por esta razón no es conveniente hacer conexiones cuando existan pendientes bajas entre elementos o en la misma estructura.

Durante el proceso del diseño de las conexiones fue necesario regresar en varias ocasiones a modificar la configuración de la cercha por razones constructivas, en algunos casos se buscó una inclinación más favorable para la conexión, como también se propuso aumentar el peralte de la cercha y levantarla unos centímetros para favorecer esta técnica.

Se ha propuesto una conexión tipo sándwich, utilizando placas de acero y pernos A 325 o pernos A 307, los estados límites en los elementos del aluminio se revisarán de acuerdo al ADM y para las placas y los pernos de acuerdo al manual AISC 360-16.

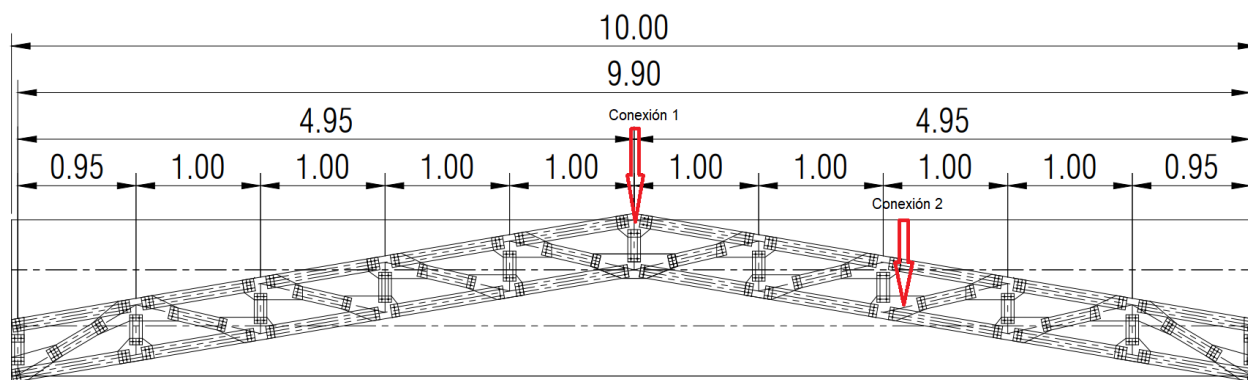
Se verificará el diseño para los dos casos más críticos, que son la estructura de techo #1 y la estructura de techo #4, en la estructura de techo #2 y #3 se utilizó el mismo perfil que para la estructura #4 y la mayor demanda se encuentra en la estructura de techo #4, sin embargo, la configuración de todas las cerchas fue modificada asumiendo conexiones emperradas.

Diseño de conexiones en la estructura de techo #1

A continuación, se revisarán dos conexiones correspondientes a la cercha de techo #1, señaladas en la siguiente imagen.

Figura 38

Conexiones en cercha de techo #1

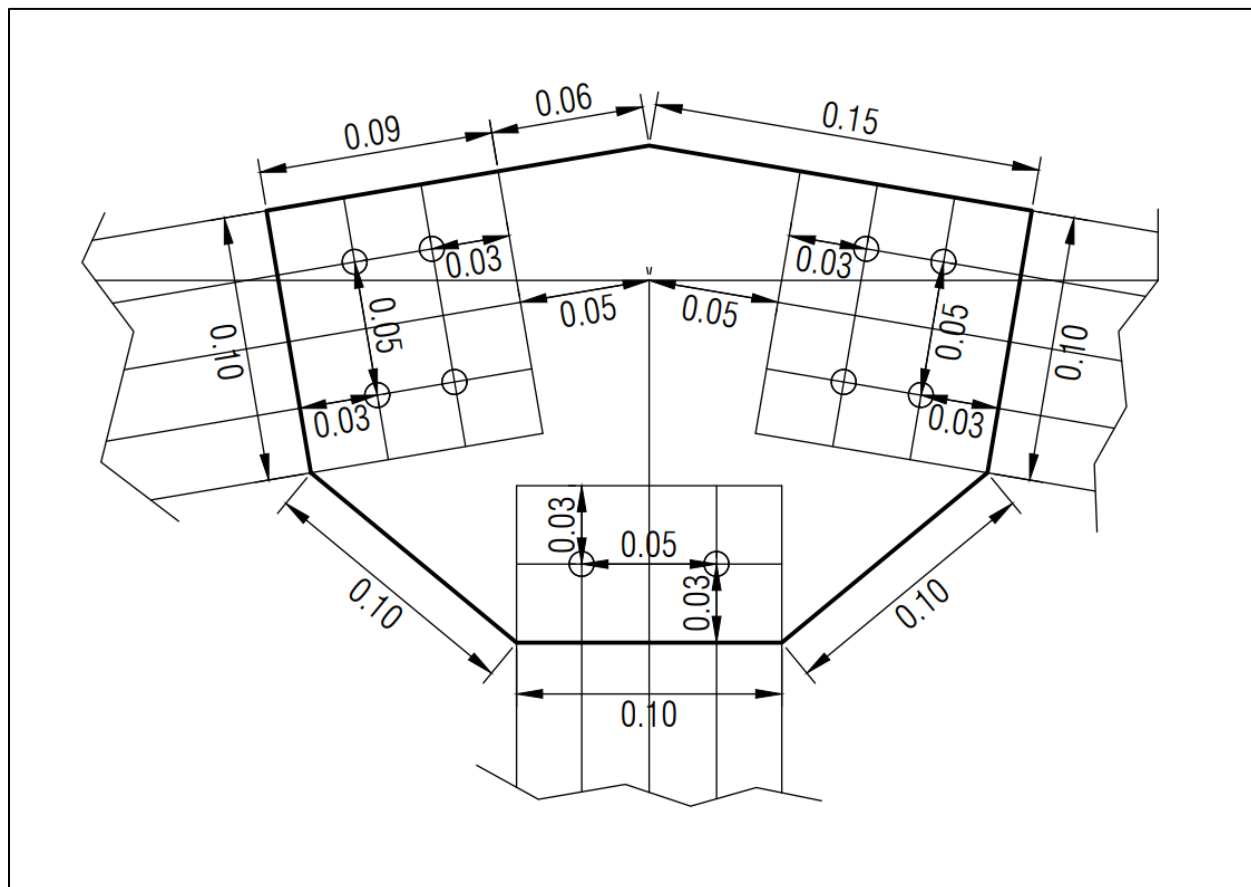


CERCHA #1 - 10metros

Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 39

Conexión 1 en cercha de estructura de Techo #1



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Resistencia de diseño de los pernos

Primeramente, será analizada la resistencia de los pernos, se utilizará pernos A307 permitidos por la norma ADM, con un diámetro de 3/8 de pulgada, para la conexión en la cuerda superior se proponen cuatro pernos cuya resistencia es la siguiente:

Figura 40*Resistencia de diseño en pernos 3/8*

Resistencia de Diseño de Perno			
Capacidad Total	17.89	8.1 Ton	
Capacidad x PL	8.95	4.1 Ton	
A_n in ²	F_{nv}	R_n K	ϕR_n K
0.11	27	2.98	2.24

Nota. Elaborado por la autora.

Resistencia de diseño del perfil

Ahora se analizará la resistencia del perfil en la conexión, cuyas características se muestran a continuación.

Figura 41*Datos del perfil de aluminio*

Datos del Perfil 1 de Aluminio		
F_y	25	ksi
F_u	30	ksi
t	0.13	in
L.horiz-pernos	3.00	cm
d_b	2.5	cm
P_u	6.27	Ton

Nota. Elaborado por la autora.

Al analizar tanto el estado límite de esfuerzo de bloque de cortante y el estado límite de desgarre y aplastamiento para el perfil, se obtiene que el estado límite que rige es la resistencia por desgarre y aplastamiento.

Figura 42*Estado límite de diseño para el perfil 1*

Resistencia de Diseño por Desgarre y Aplastamiento							
17.55 ksi		8.0 Ton					
Capacidad Total por Aplastamiento y Desgarre							
Pernos en el borde		Rige Aplastamiento		Pernos en el centro		Rige Aplastamiento	
Lc in	F _u Ksi	Desgarre d _e .t.Ft _u	Aplastamiento 2.D.t.Ft _u	Lc in	F _u Ksi	Desgarre d _e .t.Ft _u	Aplastamiento 2.D.t.Ft _u
0.98	30	3.84 ksi	2.93 ksi	1.18	30	4.61 ksi	2.93 ksi

Nota. Elaborado por la autora.***Resistencia de diseño por compresión***

Se procede a revisar el diseño a compresión, de acuerdo a la Figura 39, la distancia al eje es de 5 centímetros, la cercha tanto en su cuerda superior como en su cuerda inferior tiene esa misma distancia de separación al eje. La propuesta de la placa es de 5 milímetros y sus propiedades se muestra en seguida.

Figura 43*Datos de la placa 5 mm*

Datos de la Placa		
F _y	36	ksi
F _u	58	ksi
t	0.2	in

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 44

Resistencia a compresión en la placa 5 mm

Resistencia de Diseño a Compresión			
25.5 kip		11.6 Ton	
L_w in	A_g in²	P_n Kips	φP_n K
1.97	0.39	14.17	25.51

Nota. Elaborado por la autora.

Resistencia de diseño de la placa

Y por último se muestra el estado límite que rige en el diseño de la placa.

Figura 45

Estado límite de diseño en la placa 5mm.

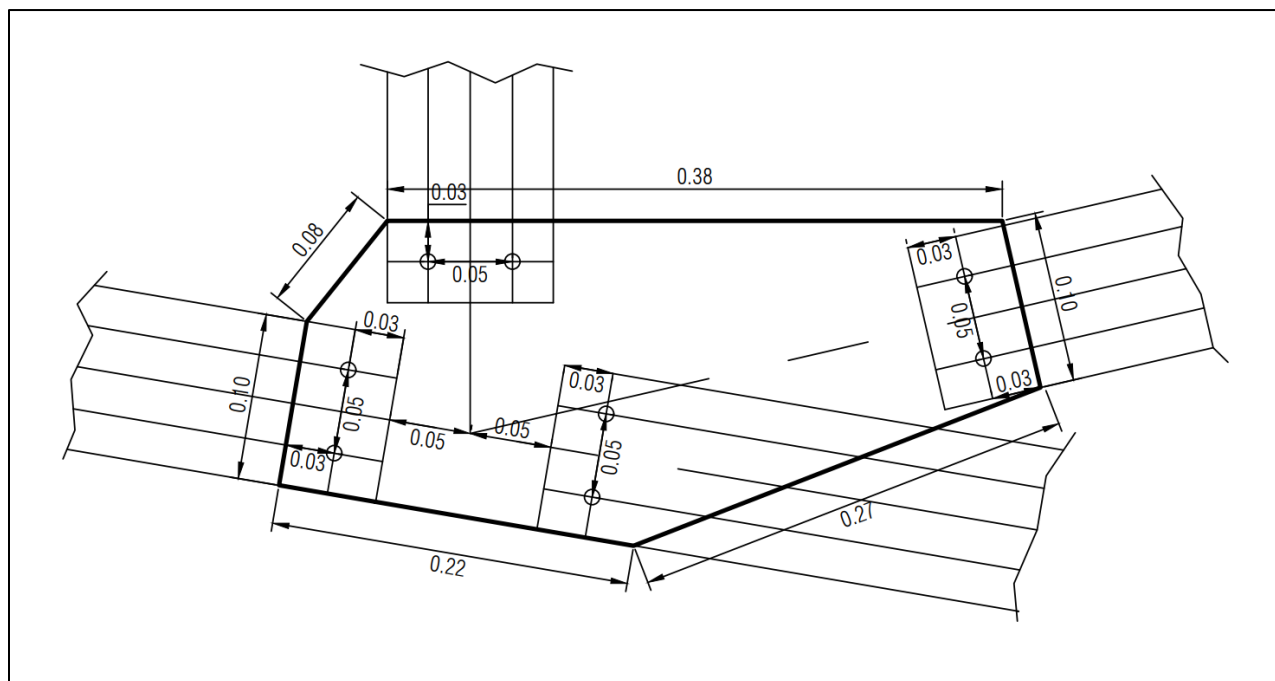
Resistencia de Diseño en Longitud de Whitmore							
44.0 kip		20.0 Ton					
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia L_w				E.L.#2 Esfuerzo Último L_w			
L_w in	F_y Ksi	A_g in²	P_n Kips	φP_n K	F_u Ksi	P_n K	φP_n K
3.40	36	0.68	24.45	44.0	58	39.39	59.08

Nota. Elaborado por la autora.

En resumen, se tiene una conexión con cuatro pernos A307 de 3/8 de pulgada de diámetro, una placa de 5 milímetros de espesor con espaciamentos en la placa de acuerdo a la Figura 39, para la conexión dos se tiene dos pernos con las mismas características, la placa es del mismo espesor y sus separaciones se observan en la Figura 46.

Figura 46

Conexión 2 en cercha de estructura de Techo #1



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

La siguiente tabla muestra, los esfuerzos de diseño de acuerdo al número de pernos y a la distancia libre hacia eje, esta distancia es para calcular la resistencia a compresión. El tamaño de los pernos se mencionó anteriormente, así como el espesor de la placa. En el Anexo 2 se muestran los detalles de la cercha de techo #1, en algunos casos se colocaron 4 pernos en la cuerda inferior para cumplir con la demanda, las conexiones fueron revisadas para verificar que el diseño cumpliera con el caso más crítico existente tanto a tensión , compresión y cortante.

Figura 47

Datos de diseño para conexión 1 y 2 del techo#1

	# Pernos	Distancia al eje	Pu (Ton)	E.L. Pernos	E.L. Perfil	E.L. Compresión	E.L. Placa
Conexión 1	4	5 cm	6.27	8.1 Ton	8.0 Ton	11.6 Ton	20.0 Ton
Conexión 2	2	2 cm	2.37	4.1 Ton	4.0 Ton	4.6 Ton	14.21 Ton

Nota. Elaborado por la autora.

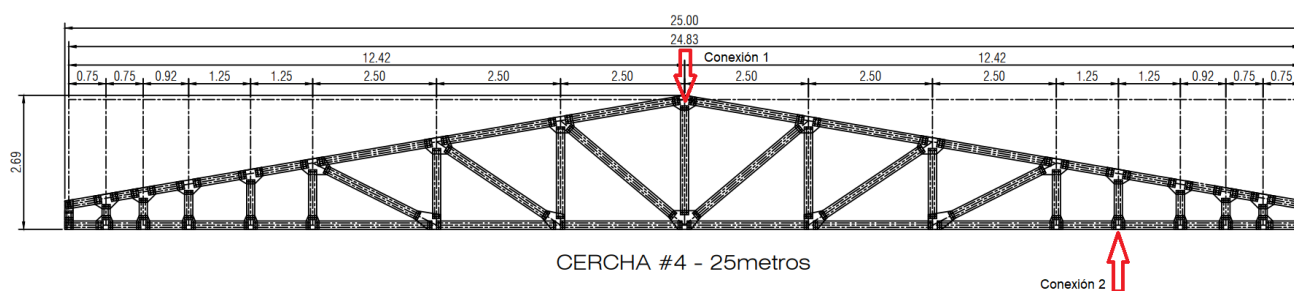
De acuerdo a los datos de la tabla anterior se puede analizar que el perfil de aluminio es el limitante en el diseño y el estado que rige principalmente es el del desgarre y aplastamiento, este estado límite está asociado principalmente al espesor del perfil y a su resistencia.

Diseño de conexiones en estructura de techo #4

Seguidamente se verificarán dos casos de conexión para la cercha de techo #4.

Figura 48

Conexiones en cercha #4

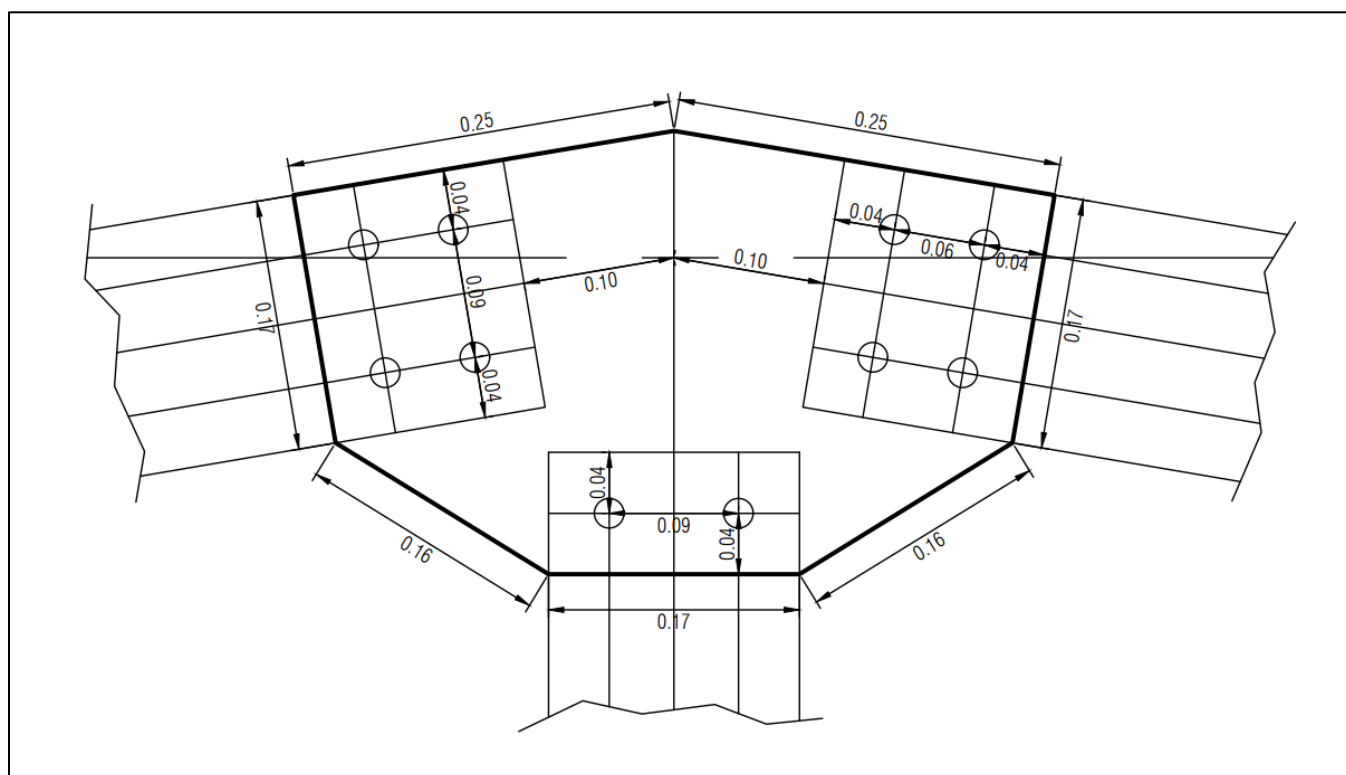


Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

La propuesta para la conexión en la cuerda superior es de cuatro pernos A307 de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro, una placa de 6 milímetros de espesor y para la conexión 1 se muestra sus separaciones en la siguiente imagen, además el perfil de diseño es el perfil 2 cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 3.

Figura 49

Conexión 1 en cercha de estructura de Techo #4



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Seguidamente se mostrará los estados límites que rigen en cada una de las partes de la conexión antes mostrada.

Resistencia de diseño en los pernos

La siguiente tabla muestra la resistencia de diseño para cuatro pernos A307 de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro.

Figura 50

Resistencia de diseño en pernos $\frac{3}{4}$

Resistencia de Diseño de Perno a Cortante			
Capacidad Total	71.57	32.5 Ton	
Capacidad x PL	35.78	16.2 Ton	
A_n in²	F_{nv}	R_n Kips	ϕR_n K
0.44	27	11.93	8.95

Nota. Elaborado por la autora.

Resistencia de diseño del perfil

En esta ocasión se mostrará la resistencia en la conexión para el perfil 2, de acuerdo al estado límite que gobierne.

Figura 51

Datos del perfil 2 de aluminio

Datos del Perfil 2 de Aluminio		
F_y	25	ksi
F_u	30	ksi
t	0.39	in
L.horiz-pernos	6.00	cm
d_b	4	cm
P_u	26.84	Ton

Nota. Elaborado por la autora.

Nuevamente, la limitante en el perfil es la resistencia por desgarre y aplastamiento, pero en esta ocasión los valores son altos comparados a la demanda en la conexión.

Figura 52*Estado límite de diseño para el perfil 2*

Resistencia de Diseño por Desgarre y Aplastamiento							
105.30 ksi		47.8 Ton					
Capacidad Total por Aplastamiento y Desgarre							
Pernos en el borde		Rige Aplastamiento		Pernos en el centro		Rige Aplastamiento	
L_c in	F_u Ksi	Desgarre $d_e.t.F_{t_u}$	Aplastamiento $2.D.t.F_{t_u}$	L_c in	F_u Ksi	Desgarre $d_e.t.F_{t_u}$	Aplastamiento $2.D.t.F_{t_u}$
1.57	30	18.43 ksi	17.55 ksi	2.36	30	27.64 ksi	17.55 ksi

Nota. Elaborado por la autora.***Resistencia de diseño por compresión***

Debido a que la demanda en esta conexión es más de cuatro veces mayor a la conexión de la estructura antes analizada, se ha aumentado el espesor de la placa, más sin embargo este aumento no es considerable.

Figura 53*Datos de la placa 6 mm*

Datos de la Placa		
F_y	36	ksi
F_u	58	ksi
t	0.25	in

Nota. Elaborado por la autora.**Figura 54***Resistencia a compresión en la placa 6 mm*

Resistencia de Diseño a Compresión			
63.8 kip		28.9 Ton	
L_w in	A_g in²	P_n kip	ϕP_n K
3.94	0.98	35.43	63.78

Nota. Elaborado por la autora.

Resistencia de diseño de la placa

Tras analizar los estados límites en la placa, de acuerdo a los datos brindados y las características de la conexión mostrados en la Figura 49, se ha determinado que el estado límite que rige en la placa es la siguiente.

Figura 55

Estado límite de diseño en la placa 6mm

Resistencia de Diseño en Longitud de Whitmore							
98.5 kip		44.7 Ton					
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia L_w					E.L.#2 Esfuerzo Último L_w		
L_w in	F_y Ksi	A_g in²	P_n Kips	ϕP_n K	F_u Ksi	P_n K	ϕP_n K
6.08	36	1.52	54.70	98.5	58	88.13	132.20

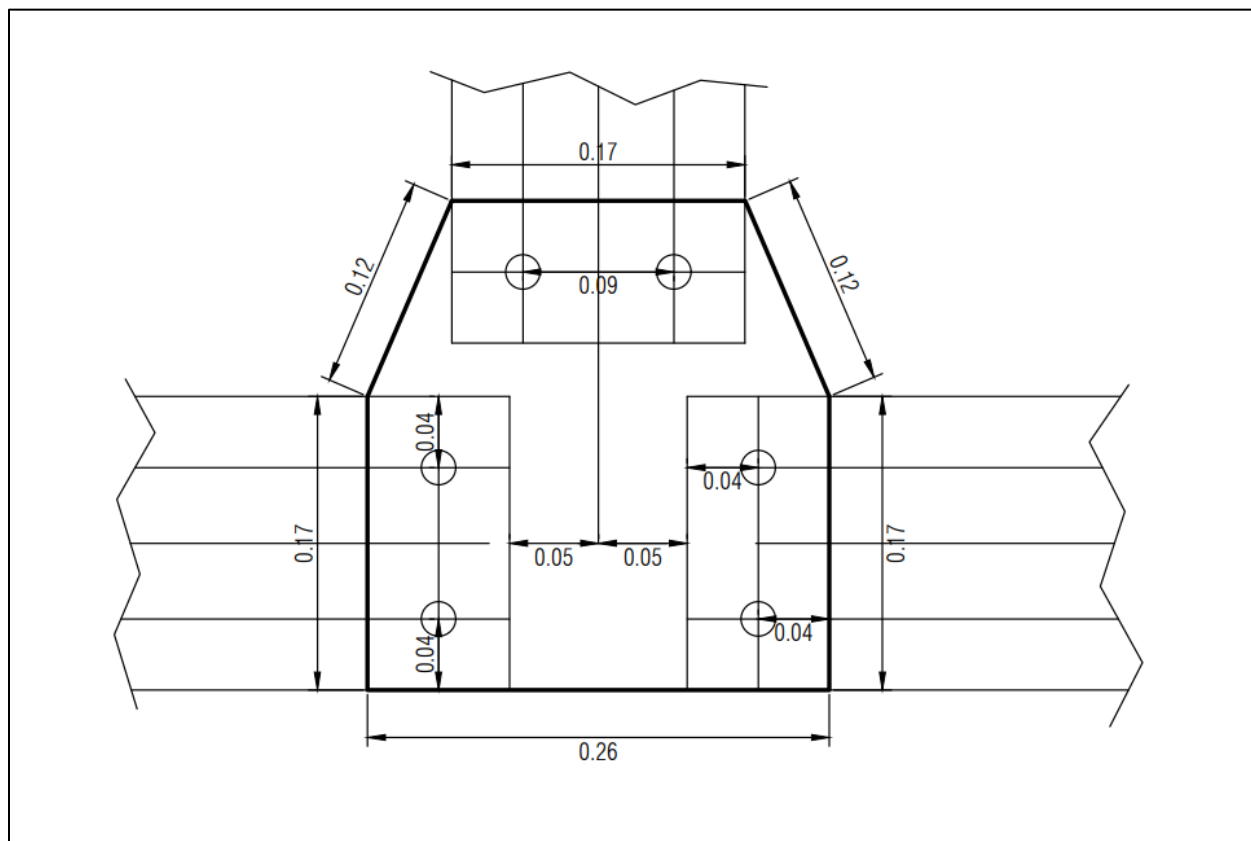
Nota. Elaborado por la autora.

En resumen, para esta conexión se utilizaron cuatro pernos A307 de 3/4 de pulgada de diámetro, una placa de 6 milímetros de espesor, además el diseño se verificó para las dimensiones propuestas en la Figura 49, dando como resultado un diseño satisfactorio.

La siguiente imagen muestra las características de una de las conexiones en la cuerda inferior de la cercha de techo #4.

Figura 56

Conexión 2 en cercha de estructura de Techo #4



Nota. Elaborado por la autora mediante AutoCAD.

Figura 57

Datos de diseño para conexión 1 y 2 del techo#4

	# Pernos	Distancia al eje	Pu (Ton)	E.L. Pernos	E.L. Perfil	E.L. Compresión	E.L. Placa
Conexión 1	4	10 cm	26.84	32.5 Ton	47.8 Ton	28.9 Ton	44.7 Ton
Conexión 2	2	5 cm	8.20	16.2 Ton	23.9 Ton	14.5 Ton	26.09 Ton

Nota. Elaborado por la autora.

La tabla anterior muestra la resistencia de diseño de las dos conexiones analizadas para la cercha cuyo claro es de 25 metros, ambas conexiones cumplen con la demanda, en los casos donde se encuentran cuatro pernos en la cuerda inferior es por asuntos de demanda, por otra parte, en el Anexo 2 se encuentran los detalles de la cercha de techo #4.

Para la conexión 1, el estado límite que rige en la placa es la Longitud de Whitmore, y para la conexión 2 rige es el desgarre, en el caso del perfil, en ambos casos rige es el aplastamiento, mientras que para los pernos su resistencia aumenta conforme aumenta la cantidad de pernos y su diámetro.

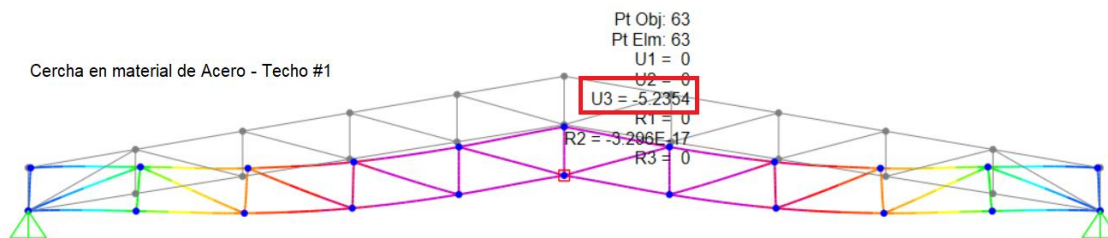
La limitante en la conexión 1 es la resistencia a compresión, a pesar de esto con solo aumentar un centímetro su longitud, su valor aumenta significativamente, pasando de 28,9 toneladas a 31,8 toneladas su resistencia, por otra parte, los pernos cumplen con la demanda a pesar de ser pernos de mediana resistencia, demostrando ser adecuados para este tipo de estructuras.

2.4. Deflexiones

Seguidamente se muestran una serie de imágenes correspondientes a las deflexiones máximas que se presentaron en las estructuras, estas deflexiones máximas obtenidas se dieron para el caso de la combinación de carga viva más carga permanente de servicio, también se mostrará más adelante una tabla la cual contiene los tres casos mencionados en el capítulo II, sección 10 para las cuales se debe verificar que la estructura cumpla con los límites de deflexiones establecidos por The International Building Code 2018 en el caso de techos.

Figura 58

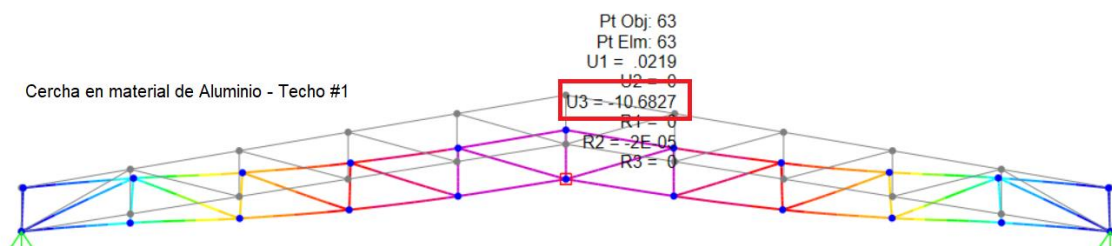
Deflexión máxima en cercha de acero - Techo #1



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 59

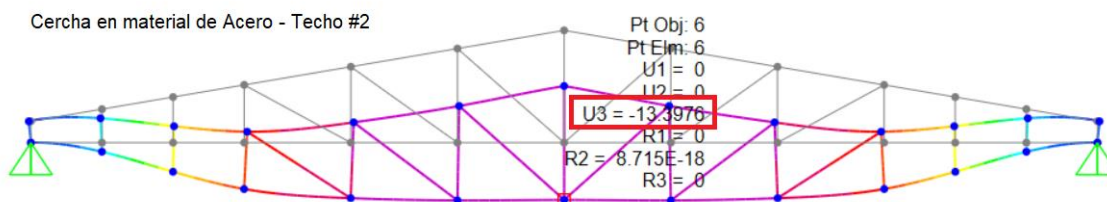
Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #1



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 60

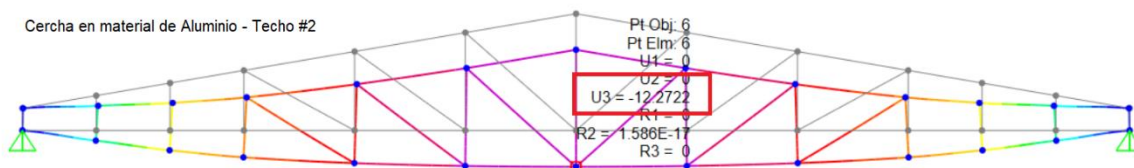
Deflexión máxima en cercha de acero- Techo #2



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 61

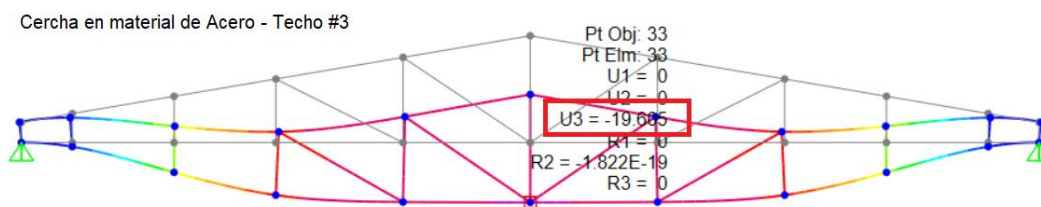
Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #2



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 62.

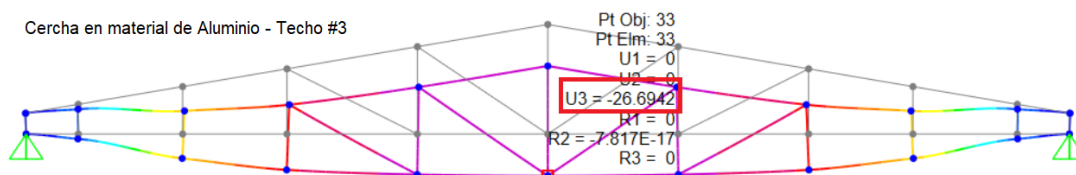
Deflexión máxima en cercha de acero- Techo #3



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 63

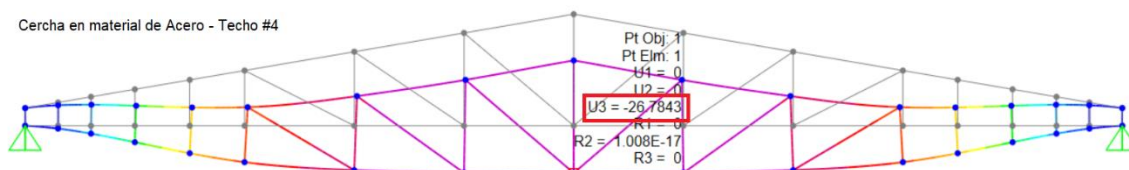
Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #3



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 64

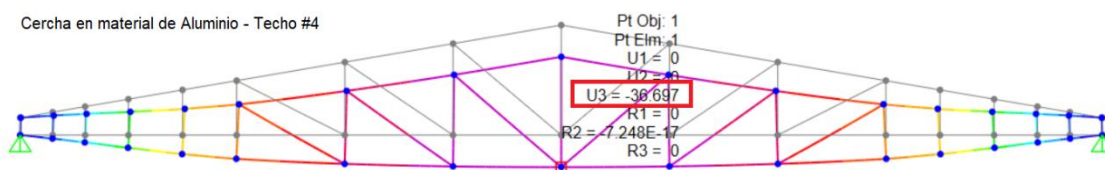
Deflexión máxima en cercha de acero- Techo #4



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

Figura 65

Deflexión máxima en cercha de aluminio- Techo #4



Nota. Elaborado por la autora mediante el uso del software SAP2000.

La siguiente imagen contiene una tabla que muestra las deflexiones provocadas a las estructuras por las cargas de viento, carga viva y carga permanente según sea el caso, estas estructuras han sido sometidas a igualdad de condiciones tanto de apoyo, como de cargas y su configuración geométrica, la única variación que se presenta es el peso propio de la estructura y las propiedades mecánicas de acuerdo al material. En cada caso se indica el claro libre según el número de techo, por otra parte, tanto los datos de cada criterio límite como el dato de las deflexiones se presentan en milímetros.

Figura 66*Deflexiones en las estructuras de acero y aluminio*

Longitud de Claro	10	m	Criterio Límite	Resultados de SAP	
Casos de estudio para las deflexiones en Techo #1			mm	Aluminio mm	Acero mm
Carga Viva	C.T	L/360	27.8	4.79	2.17
Viento	C.V	L/360	27.8	4.00	1.82
C.permanente+C.viva	C.P + C.T	L/240	41.7	10.68	5.23

Longitud de Claro	15	m	Criterio Límite	Resultados de SAP	
Casos de estudio para las deflexiones en Techo #2			mm	Aluminio mm	Acero mm
Carga Viva	C.T	L/360	41.7	5.12	5.25
Viento	C.V	L/360	41.7	4.29	4.36
C.permanente+C.viva	C.P + C.T	L/240	62.5	12.27	13.4

Longitud de Claro	20	m	Criterio Límite	Resultados de SAP	
Casos de estudio para las deflexiones en Techo #3			mm	Aluminio mm	Acero mm
Carga Viva	C.T	L/360	55.6	11.21	7.49
Viento	C.V	L/360	55.6	9.35	6.21
C.permanente+C.viva	C.P + C.T	L/240	83.3	26.69	19.61

Longitud de Claro	25	m	Criterio Límite	Resultados de SAP	
Casos de estudio para las deflexiones en Techo #4			mm	Aluminio mm	Acero mm
Carga Viva	C.T	L/360	69.4	15.31	9.89
Viento	C.V	L/360	69.4	12.83	8.25
C.permanente+C.viva	C.P + C.T	L/240	104.2	36.7	26.78

Nota. Elaborado por la autora.

Analizando el comportamiento de las estructuras ante las deflexiones por las cargas de servicio, se logra observar que para la estructura del techo #1, las deflexiones en la cercha de aluminio son el doble que, para la cercha de acero, esta discrepancia se da principalmente porque el módulo de elasticidad del aluminio es menor que la del acero. Pero por otra parte se puede ver que en la estructura de techo #2 no sucede lo mismo, las deflexiones en ambos materiales son muy similares, esto se debe a que la estructura de aluminio es muy fuerte para la demanda que se tiene,

se reitera que esta estructura quedó sobre diseñada por no existir perfiles de menor tamaño en los catálogos nacionales que cumplieren con lo requerido para poder realizar un diseño optimizado. Observando el comportamiento de la estructura antes mencionada queda de manera clara que, para lograr deformaciones similares en las secciones en aluminio, estos elementos deben poseer mayores características geométricas o mayor rigidez que los elementos en acero.

Para la estructura de techo #3 y #4 se asemeja al caso anterior, existe un sobre diseño y las estructuras son muy resistentes, por lo tanto sus deflexiones no representan más del 35% de diferencia con respecto al acero.

A pesar de que generalmente en un diseño óptimo las estructuras de aluminio son más livianas que las de acero, su comportamiento típico es que las deflexiones en sus elementos sean mayores que las deflexiones en los elementos de acero, principalmente, como se mencionó anteriormente por que el módulo de elasticidad del aluminio es de 10100 ksi mientras que el del acero es de 29000 ksi.

2.5. Valoración de costos por peso

Para realizar la comparación de estos materiales por costo, en conceso con el tutor se decide realizarla por medio del peso de las estructuras.

La técnica utilizada para obtener el costo del aluminio por kilo fue la siguiente, primeramente, se realizó una cotización en varias empresas de Costa Rica, consultando el precio de un perfil con dimensiones, espesor y largo que no serán especificados, luego de esto se determina el peso del elemento y se divide su costo entre su peso, seguido los resultados obtenidos se promedian; el precio determinado es para piezas de aluminio anodizado. A manera de comprobación se verificó con la misma metodología el precio del acero y fue determinado de la misma manera. Por cuestiones de privacidad del comercio no se dirá el nombre de las empresas consultadas ni el precio de los perfiles cotizados.

Por otra parte, este costo es válido solo al momento de ser cotizado, recordando que se está en un tiempo muy cambiante en cuanto a costos de materiales.

Una vez promediados y determinados tanto el precio del acero como el del aluminio, se extrae del software SAP 2000 el peso de las estructuras y posteriormente se multiplica por el costo por kilo. Se aclara que esta metodología es muy indirecta y quedan ciertos datos por fuera sin estimar, es solo una manera aproximada para realizar la comparación.

Tabla 14

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #1 en acero

Techo #1 - Acero						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	5
RT13 48-96-2.38	4	10.94	0.06	56.90	77,384	
RT16 100-150-1.8	2	10.13	0.07	70.50	95,880	1,136,960.00
RT5 48-72-1.5	19	14.43	0.04	39.80	54,128	
Totales	25	35.50	0.17	167.20	227,392	

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 15

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #1 en aluminio

Techo #1 - Aluminio						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	5
Perfil 1	41	35.50	0.09	88.30	547,460	2,737,300.00
Totales	41	35.50	0.09	88.30	547,460	

Nota. Elaborado por la autora.

Analizando las dos tablas anteriores, se puede observar que la cercha de aluminio es más liviana que la de acero, sin embargo, en cuanto a costo esta representa más del doble que la de

acero, su valor es de 1,4 veces mayor que la del acero, sin valorar los costos de mantenimiento momentáneamente.

El precio sugerido para el kilo de acero es de mil trescientos sesenta colones y para el aluminio es de seis mil doscientos colones. En cuanto a diferencia de peso, la estructura de acero es aproximadamente el doble que la de aluminio. Se debe recordar que por falta de variedad en los catálogos no fue posible optimizar los diseños en aluminio por lo tanto su diferencia de peso talvez no sea realmente la esperada. Por otra parte, existe un factor determinante que impidió bajar el espesor de los perfiles en las arriostres para el diseño del techo #1 en aluminio y fue la falla por aplastamiento en la conexión del perfil.

Tabla 16

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #2 en acero

Techo #2 - Acero						
Sección	Número Piezas	Longitud Total m	Peso Total Ton	Peso por Cercha Kilogramos	Precio por Cercha Precio x Kg	Cerchas por estructura 7
RT 25 100-150-4.75	2	15.22	0.27	272.90	371,144	
RT 26 100-200-4.75	3	15.60	0.34	338.00	459,680	6,487,880.00
RT 9 48-96-1.5	17	21.27	0.07	70.60	96,016	
Totales	22	52.09	0.68	681.50	926,840	

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 17

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #2 en aluminio

Techo #2 - Aluminio						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	7
Perfil 2	33	52.09	0.62	617.1000	3,826,020	26,782,140.00
Totales	33	52.09	0.62	617.10	3,826,020	

Nota. Elaborado por la autora.

Dentro de este análisis, este es el caso más crítico de todos donde la elaboración de una cercha en aluminio representa un costo de más de 3,10 veces mayor al costo del acero y además en cuanto a peso son prácticamente iguales, donde la cercha en acero pesa 681,5 kilogramos mientras la cercha de aluminio pesa 617,10 kilogramos.

Tabla 18

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #3 en acero

Techo #3 - Acero						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	9
RT 16 100-150-1.8	13	22.52	0.16	156.80	213,248	
RT 26 100-200-4.75	2	20.29	0.44	439.50	597,720	14,105,376.00
RT- AR 1	3	20.80	0.56	556.10	756,296	
Totales	18	63.61	1.15	1152.40	1,567,264	

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 19

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #3 en aluminio

Techo #3 - Aluminio						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	9
Perfil 2	27	63.61	0.75	753.6000	4,672,320	42,050,880.00
Totales	27	63.61	0.75	753.60	4,672,320	

Nota. Elaborado por la autora.

Para el caso de la estructura de techo #3 donde su claro libre es de 20 metros se observa un panorama mejor que el anterior más sin embargo no el deseable, analizando la estructura de aluminio, su peso es menor que la de acero, pero su costo sigue siendo alto, representando un costo de 1.98 veces más que la estructura de acero.

Tabla 20

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #4 en acero

Techo #4 - Acero						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	11
RT 26 100-200-4.75	2	25.36	0.55	549.40	747,184	
RT 16 100-150-1.8	21	36.80	0.26	256.30	348,568	28,784,536.00
RT-AR3 100-400-5.65	3	25.80	1.12	1118.40	1,521,024	
Totales	26	87.96	1.92	1924.10	2,616,776	

Nota. Elaborado por la autora.

Tabla 21

Valoración aproximada por peso de la estructura de techo #4 en aluminio

Techo #4 - Aluminio						
Sección	Número Piezas	Longitud Total	Peso Total	Peso por Cercha	Precio por Cercha	Cerchas por estructura
		m	Ton	Kilogramos	Precio x Kg	11
Perfil 2	39	87.96	1.04	1042.20	6,461,640	71,078,040.00
Totales	39	87.96	1.04	1042.20	6,461,640	

Nota. Elaborado por la autora.

En este último caso se da una situación muy similar a la primera, el peso de la estructura en aluminio representa la mitad del peso de la estructura en acero y el costo de esta es aproximadamente 1.47 veces mayor que la de acero.

Después de haber analizados los casos anteriores, queda claro que cuando no se realiza una debida optimización esta repercute en los costos de los materiales.

Otra valoración de costos relacionada al peso de las estructuras es el izaje, de acuerdo a lo leído en la literatura se dice que cuando las estructuras son más livianas los procesos de construcción son más rápidos, dado como resultados una disminución en el costo de mano de obra o en algunas ocasiones se evita usar maquinaria especializada para este trabajo.

Tabla 22

Peso de las estructuras

Material	Peso de las Estructuras	
	Acero Ton	Aluminio Ton
Techo #1	0.167	0.088
Techo #2	0.682	0.617
Techo #3	1.152	0.754
Techo #4	1.924	1.042

Nota. Elaborado por la autora.

La tabla anterior muestra el peso por cercha, para el techo #1 y #4 que son los que se adaptan mejor a un diseño optimizado, se puede notar una diferencia de peso en la cercha de aluminio de casi la mitad con respecto a las estructuras de acero. Esta diferencia de peso es realmente considerable al momento de ejecutar obras, por ejemplo, para levantar la cercha de acero que pesa como 167 kilogramos se necesitarían 4 trabajadores, mientras que para levantar la cercha de aluminio que pesa 88 kilogramos se podría realizar la labor con dos trabajadores. En caso de ser cerchas o estructuras que requieran el uso de grúas, se dice que las labores de ejecución son más rápidas.

2.6. Valoración de costos por mantenimiento

Casi siempre que se habla del aluminio hay una característica muy importante que resalta de este material, y es el bajo costo de mantenimiento, por lo general se dice que solo requiere de limpieza.

Según (European Aluminum, 2020), buscando un material que casi no requiera mantenimiento de por vida, el aluminio es el material de elección. Su durabilidad combinada con su revestimiento resistente y acabados típicos, como la anodización, hace que las estructuras de aluminio sean extremadamente fáciles de mantener. Los trabajos de mantenimiento de los productos de aluminio son prácticamente innecesarios debido al excelente comportamiento frente a la corrosión de este elemento. Si bien las medidas de protección pueden afectar a los elementos que se utilizan para ensamblar estructuras miembros (por ejemplo, pernos), la mayoría de las estructuras de aluminio pueden permanecer desprotegidas si las condiciones ambientales lo permiten (p.74).

Por otra parte, el acero si requiere de un recubrimiento adecuado para evitar la corrosión, por lo tanto, a los precios antes citados se deben agregar el costo por materiales de recubrimiento (pinturas) y además la mano de obra para realizar esta labor, esto implica también otros costos relacionados a la mano de obra como las cargas sociales.

Este trabajo de proteger las estructuras no solo se debe realizar antes de su montaje, sino que es necesario darles un adecuado mantenimiento para mantener su integridad y garantizar su funcionamiento e integridad al pasar de los años.

De acuerdo a lo consultado a técnicos especialistas en pinturas de nuestro país, lo recomendado es realizar un mantenimiento preventivo al menos cada tres años y como máximo cada cinco a las estructuras de acero.

Al tratar de investigar sobre el costo de mantenimiento de estas estructuras, la respuesta ha sido que no se tiene un dato exacto, primeramente, porque el costo está relacionado principalmente con el estado de la estructura y por otra parte no es común que se les de mantenimiento preventivo.

Tras realiza una cotización a un pintor para una estructura con características similares a la estructura de techo#1, cuyas condiciones de mantenimiento no requieran más que de una limpieza previa a la aplicación de los productos de recubrimiento, con base a esa cotización se determina un valor por costo de mantenimiento de diez mil colones por metro cuadrado, y aplicándolo a la primera estructura cuya área es de 200 metros, se tiene que el valor será de dos millones de colones. Por otro parte, relacionado al dato cotizado para la estructura de acero se toma un costo por mantenimiento en el aluminio de cuatro mil colones el metro cuadrado, asumiendo que el mantenimiento estará basado solo en la limpieza de la superficie.

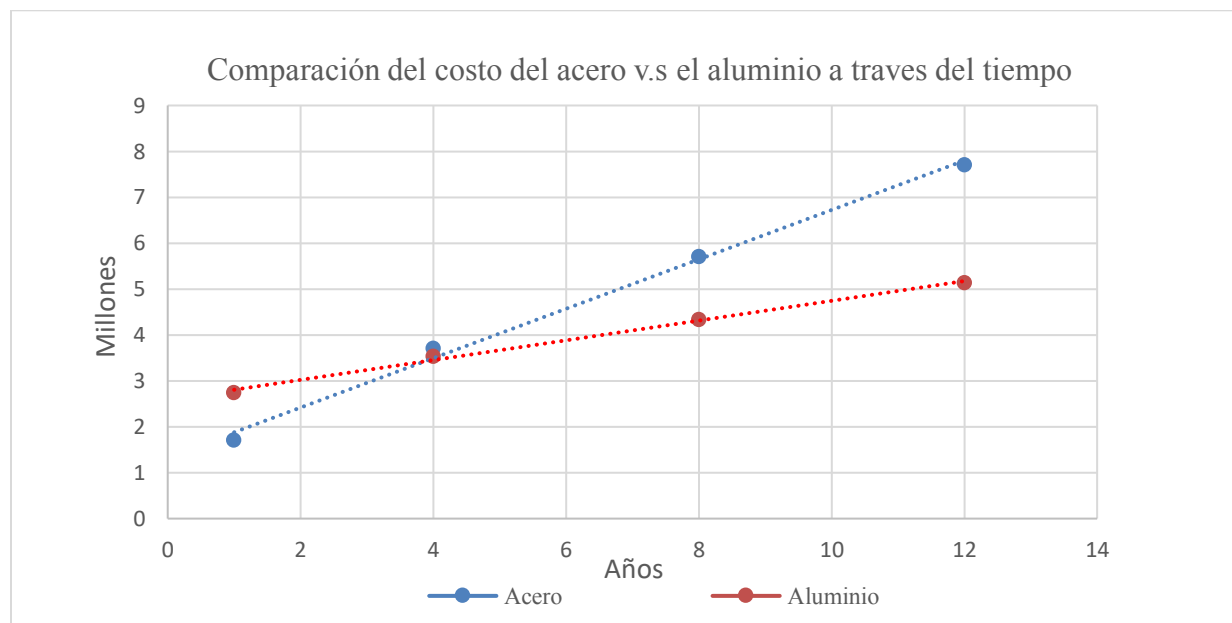
Si tomamos la estructura de techo #1 y despreciamos lo referente a conexiones para realizar una comparación, recordemos que la estructura en aluminio tiene un costo de aproximadamente 1,5 veces mayor que la de acero, ahora asumamos que, por costos de mano de obra y materiales para el recubrimiento en su etapa inicial de construcción, más los gastos que se pueda generar en el proceso constructivo debido a su peso y que conjuntamente sumando estos factores sean aproximadamente 0,5 más al costo inicial por materiales. Ahora valoremos los costos por mantenimiento que anteriormente fueron determinados, los cuales representan casi el doble del valor del material, por lo tanto, se podría decir de manera muy indirecta que, aunque el costo inicial del material en aluminio es alto comparado con el acero, estos costos se equiparan a no muy largo plazo. Se aclara que al haber muy poca experiencia en aluminio en el país y existir cierto celo industrial por brindar información que pueda esclarecer ciertos datos en esta investigación, la comparación por costos debe realizarse de una manera muy indirecta.

Como también se recalca nuevamente que las conexiones han sido descartadas para realizar esta comparación entre los materiales, reconociendo el peso que pueden generar las placas a la

estructura de aluminio, el costo de los pernos, el costo por plaquear y troquelado, así como el costo de soldadura y su respectiva mano de obra e inspección. La decisión se da principalmente por la dificultad que poseen éstas de ser cotizadas.

Figura 67

Gráfico comparativo del costo del acero vs. el aluminio a través del tiempo



Nota. Elaborado por la autora.

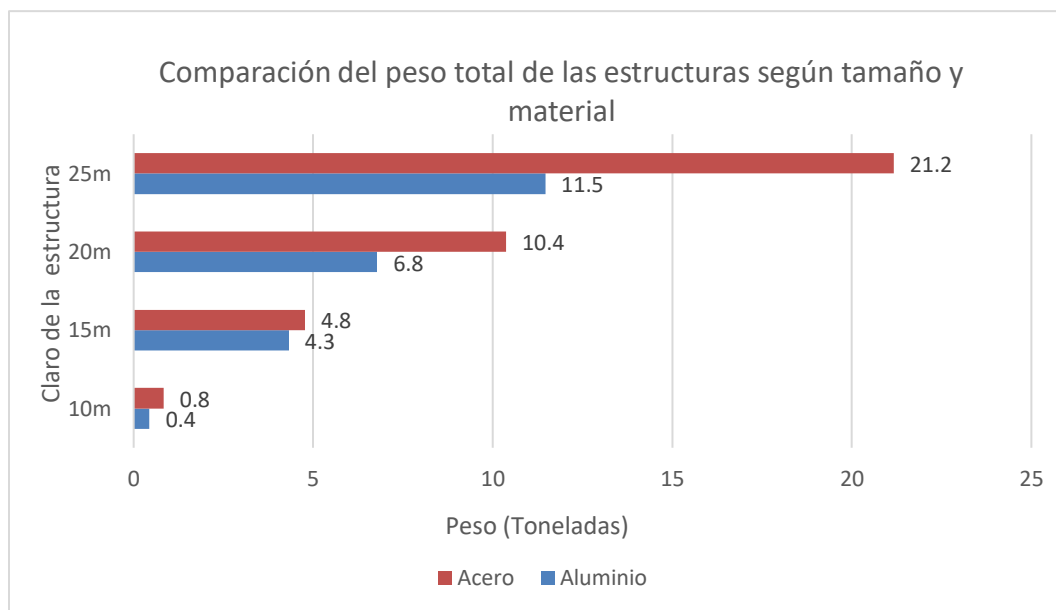
El gráfico anterior, muestra la variación del costo de las estructuras al pasar de los años, considerando los factores de mantenimiento para ambos materiales.

Estos resultados podrían verse afectados por los costos que se puedan incurrir en la realización de las conexiones que fueron despreciadas para esta comparación. Las conexiones emperradas suelen incrementar los costos de la obra por el proceso de elaboración, sin embargo, el proceso de izaje es más rápido. Las conexiones emperradas tienen un costo de material y de mano de obra mayor en la fabricación, pero el proceso de izaje es más rápido que las conexiones soldadas, las cuales requieren de un proceso laborioso para garantizar una adecuada conexión y en algunas ocasiones se requiere de procesos de inspección que podrían aumentar su costo.

A continuación, se mostrarán unos gráficos, los cuales presentan a manera de resumen los principales resultados obtenidos para esta investigación.

Figura 68

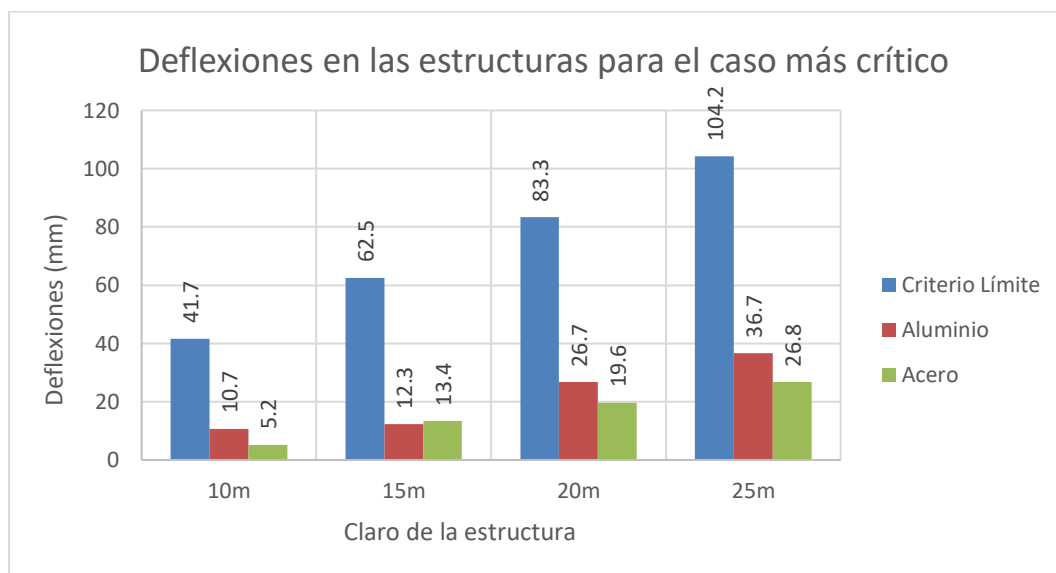
Comparación de las estructuras por peso total



Nota. Elaborado por la autora.

Figura 69

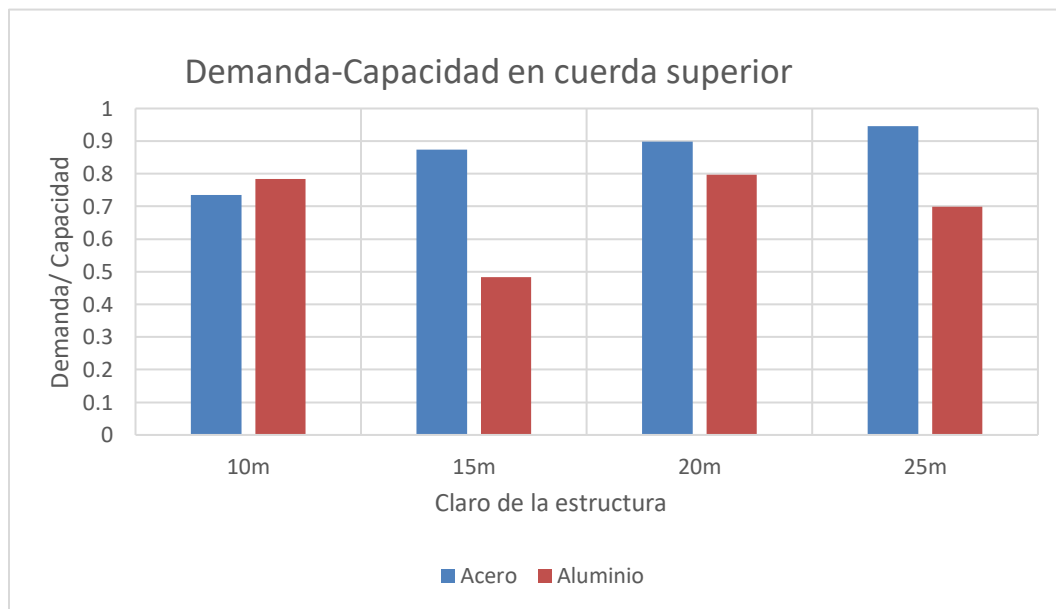
Deflexiones en las estructuras para el caso más crítico del análisis



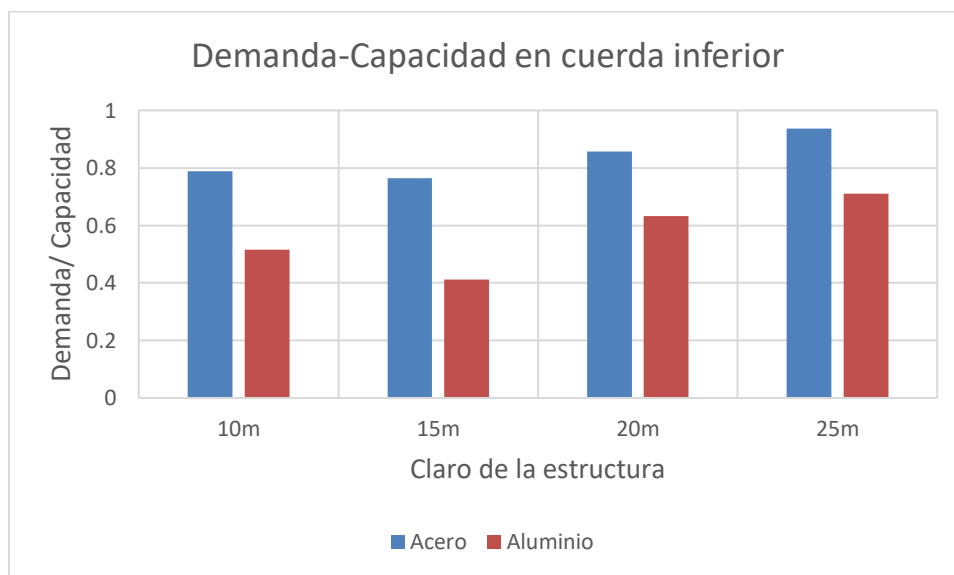
Nota. Elaborado por la autora.

Figura 70

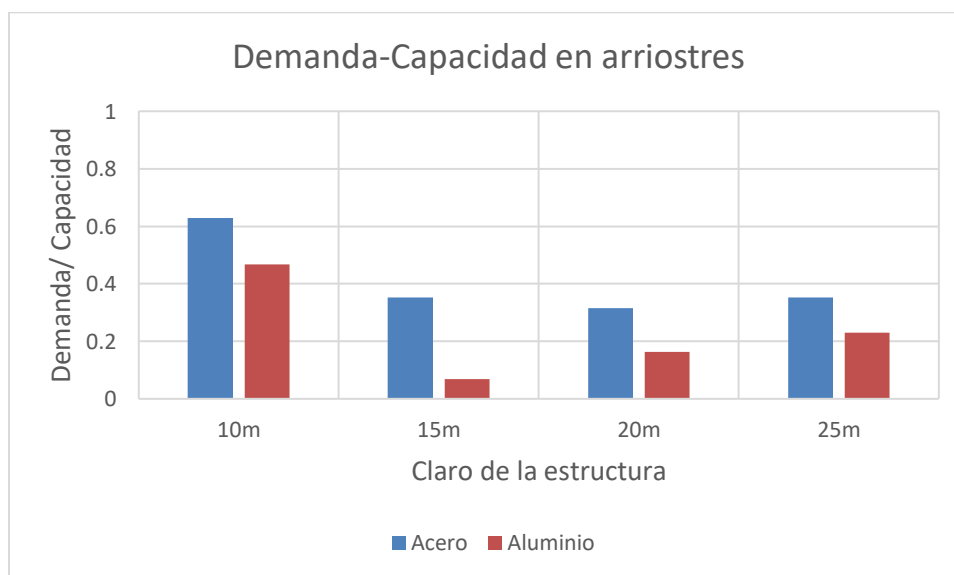
Demanda-Capacidad en cuerda superior



Nota. Elaborado por la autora.

Figura 71*Demanda-Capacidad en cuerda inferior*

Nota. Elaborado por la autora.

Figura 72*Demanda-Capacidad en arriostres*

Nota. Elaborado por la autora.

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se concluye que las principales normativas para el diseño en aluminio son el Manual de Diseño de Aluminio y su versión más actualizada 2020 y el Eurocódigo 9, Diseño de estructuras de aluminio, sin embargo, estas poseen un costo de adquisición, conjuntamente los documentos o estudios basados en estas normas se encuentran desactualizados, en cuanto a métodos de diseño existen dos, que son los más utilizados en el diseño estructural y es la metodología ASD y LRFD.

Se determina que, si hay capacidad de fabricación de aluminio en Costa Rica para los rangos establecidos en este estudio, sin embargo, los perfiles disponibles en los catálogos nacionales no son los suficientes para generar diseños optimizados en estructuras con claros que van desde los 10 metros hasta los 25 metros, como consecuencia los diseños son realmente costosos, por lo tanto, si se abre la oportunidad de producir o importar más variedad de perfilería se podrían bajar los costos consecuente con diseños más optimizados.

Se demuestra que los elementos en aluminio son más flexibles que los elementos en acero, por otra parte, los resultados demostraron que para igualar condiciones de deflexiones se debe usar elementos con características geométricas mayores o de mayor rigidez que las de acero, lo cual genera un alto costo de inversión incurriendo por lo tanto en un sobre diseño.

Se señala que las condiciones de servicio no fue una limitante en el diseño estructural, a pesar de que el aluminio generalmente presenta mayores deflexiones que el acero, así es que, este material cumplió con los criterios de límites establecido por The International Building Code 2018 (IBC).

Los resultados demostraron en algunos casos, bajas relaciones de demanda capacidad para el aluminio y moderados valores de demanda capacidad para el acero, por lo tanto, esto demuestra que para estructuras donde sus claros sean mayores que diez metros, si hay posibilidad de realización, pero a cambio de un muy alto costo. Es de esperarse una carencia de variedad en perfilería de aluminio donde las practicas constructivas de nuestros países son principalmente en acero y no es común el diseño estructural en aluminio.

Las conexiones soldadas castigan la resistencia del aluminio, pero esto no quiere decir que no sea posible de realizar sino más bien que se requerirá de elementos de mayor tamaño para cumplir con las mismas demandas.

Se concluye que durante el periodo de realización de este estudio el acero ha demostrado ser más factible desde el punto de vista económico en su proceso inicial como material de construcción (corto plazo: menor a 3 años), sin embargo, al compararlo a un lapso de tiempo no mayor a cinco (mediano plazo: 5 años) se puede decir que su costo es equiparado con el aluminio y a largo plazo (mayor a 10 años) se concluye que el aluminio es más viable desde el punto de vista económico, finalmente se aclara que estos datos comparativos solo son válidos para este periodo dado a que hay variantes que podrían afectar los resultados en el futuro.

Las principales limitantes para esta investigación son las siguientes, el acceso a información actualizada, la escasez de variabilidad de perfiles de aluminio disponibles en el país y la estimación de costos.

Recomendaciones

Se recomienda elaborar conexiones mecánicas en los elementos de aluminio, y no soldadas porque este método reduce considerablemente su resistencia.

Se recomienda realizar diseños optimizados en el aluminio, porque de lo contrario se incurre en altos costo de inversión.

Si por cuestiones de gustos o necesidad se decide construir estructuras en aluminio, las recomendaciones es que de rangos mayores a 10 metros y menores a 25 metros se reconsidere su elaboración, dado a que implican grandes costos de inversión, al menos que en nuestro país las condiciones de actuales cambien.

Se recomienda diseñar estructuras de techos con pendientes mayores al 15% cuando las conexiones son empernadas, para evitar complicaciones al momento de diseñarlas.

El Código Sísmico de Costa Rica debería de considerar el diseño en aluminio, dado a que en su contenido no existe un capítulo para el diseño de aluminio, ni tampoco hay una norma nacional que regule su diseño por lo tanto se sugiere que sea regulado también por parte de la INTECO.

Se recomienda realizar un estudio para determinar los tamaños de estructuras que se puedan realizar con la perfilería disponible en el país, pero considerando los elementos de aluminio unidos por conexiones soldadas.

Se recomienda realizar un presupuesto más detallado que pueda incluir en la comparación el costo de las conexiones.

Se recomienda fomentar el estudio sobre el diseño estructural en aluminio en las universidades, así como se brindan cursos de diseño en acero y en concreto.

Se recomienda para futuros estudios considerar el comportamiento de las estructuras de aluminio ante la fatiga.

Referencias

- American Institute of Steel Construction, . (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión de los Lineamientos de Costa Rica. (2021). *Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica*. San José.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Comité Europeo de Normalización [CEN]. (2007).
- Computers and Structures, I. (1978-2021). *Manual de diseño de marcos de aluminio*. For SAP2000.
- European Aluminium Association. (2016). *La Sostenibilidad del Aluminio en la Edificación*. Retrieved from <https://european-aluminium.eu/media/1313/es-sustainability-of-aluminium-in-buildings.pdf>
- European Aluminum. (2020, Noviembre). Diseño de estructuras de aluminio introducción al Eurocódigo-9, con ejemplos . Retrieved from <https://www.european-aluminium.eu/media/2997/design-of-aluminium-structure-introduction-to-eurocode-9-with-worked-examples.pdf>
- GAIKER-IK4. (2016, .). Ensayos de comportamiento al fuego de tres materiales (Aluminio, madera y PVC) para comparar la densidad de humos generados y la toxicidad de los gases emitidos durante la combustión de los mismos. Retrieved from https://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/Estudio_Gaiker.pdf
- International Code Council, I. (2018). *International Building Code* .
- Katz, M. (2011). *Materiales y materias primas: Aluminio*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/325430661_Aluminio_Guia_Didactica

- Kinssell, J., & Ferry, R. (2002). *ALUMINUM STRUCTURES* (Second Edition ed.). (I. JOHN WILEY & SONS, Ed.) New York.
- Marmolejo Castro, C. A. (2014). Manual de diseño de estructuras de aluminio. *Repositorio Institucional de la UNAM*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Retrieved from <https://repositorio.unam.mx/contenidos/362780>
- McCormac, J. C., & Cernak, S. F. (2012). *Diseño de estructuras de acero* (Vol. Quinta Edición). Quinta edición: Alfaomega Grupo Editor, México, Diciembre 2012.
- Paredes Terán, C. A., & Sánchez Caiza, E. W. (Abril 2014). *Diseño y comparación de una estructura de acero vs. una estructura de aluminio para una cubierta de 19.5 m de luz y 6 m de ancho a una altura de 12.3 m con dos apoyos posteriores*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Ramírez Ortiz, J. L. (1999, 06 30). El eurocódigo 9 "Proyecto de estructuras de aluminio". *Informes De La Construcción*, 51(461). doi:<https://doi.org/10.3989/ic.1999.v51.i461.848>
- The Aluminum Association*. (2020). Retrieved from <https://www.aluminum.org/>
- The Aluminum Association, I. (2010). *Aluminum Design Manual*.
- Wiley, J., & Sons. (2002). *Aluminum Structures* (Second ed.). New York.

ANEXO 1

Diseño de Cuerda Superior - Techo #1 - Aluminio

Datos del perfil	
t	0.13 in
b	1.75 in
d	4 in
Longitud	1.01 m
Longitud	1.01 m
LTB	1.01 m
P	6.27 Ton
Diseño satisfactorio	

Datos de Conexión	
# Agujeros T	2
Díametro	0.375 in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3800	

	0.13	A	1.43	S _x	1.42
	1.75	I _x	2.84	S _y	0.86
	4.00	I _y	0.76	J	1.86
	1.49	r _x	1.41	C _w	0.00
	3.74	r _y	0.73	Z _x	1.79

Resistencia de Diseño a Tensión

29.7 K		13.5 Ton		E.L.#2 Esfuerzo Último					
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia		E.L.#2 Esfuerzo Último							
Díametro in	F _t Ksi	A _n in ²	P _n Kips	ΦP _n K	F _u Ksi	K _c	A _e in ²	P _e K	ΦP _e K
0.38	25	1.43	35.69	32.1	30	1	1.32	39.65	29.74

Resistencia de Diseño a Compresión

23.0 K		10.4 Ton		E.L.#1 Pandeo Global										E.L.#2 Pandeo Local						Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local				
Long (in) Elemento	L _c /r _x	L _c /r _y	λ λ = √(F _c /F _e)	F _e Ksi <small>(AISC 360-16 Eq. C2-2)</small>	λ ₁ λ ₁ = √(F _c /F _e)	λ ₂ λ ₂ = C	F _c Ksi	P _n K	b/t Ala	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c Ksi <small>(AISC 360-16 Eq. C2-2)</small>	F _e Ksi <small>(AISC 360-16 Eq. C2-2)</small>	b/t Alma	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi <small>(AISC 360-16 Eq. C2-2)</small>	F _e Ksi <small>(AISC 360-16 Eq. C2-2)</small>	A _r in ²	A _w in ²	P _n K	Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local
39.76	28.20	54.66	7.12	1968.6	17.9	78.0	17.87	25.51	11.5	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	296.4	28.8	22.9	39.3	23.3	47.05	0.4	1.0	34.08	No aplica
39.76	λ = 54.66		Pandeo Inelástico		Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc= 78.00	φPn 23.0	b/t= 11.5	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 16.4.19		Fluencia	Pandeo Elástico	28.77	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Pandeo Inelástico	Pandeo Elástico			φPn 30.7	

Resistencia de Diseño a Flexión

36.3 k-in		0.42 Ton		E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia				E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura				E.L.#3 Pandeo Local						E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional				
L _w in ⁴	I _w in ⁴	M _w in-k	M _{pr} in-k	M _{pr} in-k	ΦM _w in-k	M _w in-k	ΦM _w in-k	b/t Ala	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi	b/t Alma	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c Ksi	M _{pr} in-k	ΦM _w in-k	λ	M _{pr} in-k	ΦM _w in-k
1.13	1.70	44.74	53.21	53.21	40.27	53.69	40.27	11.5	22.9	39.3	25.0	28.8	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	44.75	40.27	15.86	40.37	36.33
		40.27	47.89	47.89				b/t= 11.5	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 28.8	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	

Resistencia de Diseño a Cortante

13.1 Kip		5.0 Ton		E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura						E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo					
A _v in ²	A _w in ²	V _n K	ΦV _n K	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v Ksi	V _n K	ΦV _n K	λ ₁	λ ₂	F _v Ksi	V _n K	ΦV _n K	
1.04	0.97	17.5032	13.13	28.8	39.0	76	15.0	15.6	14.0						
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia								

Diseño de Cuerda Inferior - Techo #1 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.13	in
b	1.75	in
d	4	in
Longitud	1.01	m
Longitud	1.01	m
LTB	1.01	m
P	4.36	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Díametro	0.375	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3800	

	0.13	A	1.43	S _x	1.42
	1.75	I _x	2.84	S _y	0.86
	4.00	I _y	0.76	J	1.86
	1.49	r _x	1.41	C _w	0.00
	3.74	r _y	0.73	Z _x	1.79

Resistencia de Diseño a Tensión

29.7 K		13.5 Ton		E.L.#2 Esfuerzo Último							
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia				E.L.#2 Esfuerzo Último							
Díametro	F _t	A _n	P _t	ΦP _t	F _u	K _c	A _e	P _t	ΦP _t		
in	Ksi	in ²	Kips	K	Ksi		in ²	K	K		
0.38	25	1.43	35.69	32.1	30	1	1.32	39.65	29.74		

Resistencia de Diseño a Compresión

22.9 K		10.4 Ton		E.L.#1 Pandeo Global										E.L.#2 Pandeo Local								Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local			
Long (in)	Elemento	L _c /r _x	L _c /r _y	λ	F _e	λ ₁	λ ₂	F _c	P _n	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	F _e	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	
				$\lambda = \frac{L_c}{r} \sqrt{\frac{F_e}{E}}$	Ksi	$\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_e}{E}}$	$\lambda_1 = C$	Ksi	K	Ala					Ksi	Ksi	Alma				Ksi	Ksi	in ²	in ²	K
39.93		28.32	54.89	7.12	1968.6	17.9	78.0	17.83	25.45	11.5	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	296.4	28.8	22.9	39.3	23.3	47.05	0.4	1.0	34.08	No aplica
		λ = 54.89			Pandeo Inelástico	Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc= 78.00	φPn 22.9	b/t= 11.5	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11 y 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	28.77	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Pandeo Inelástico	Pandeo Elástico			φPn 30.7	

Resistencia de Diseño a Flexión

36.3 k-in		0.42 Ton		E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia				E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura				E.L.#3 Pandeo Local						E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional				
L _x	I _x	M _n	M _p	M _n	ΦM _n	M _n	ΦM _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	M _n	ΦM _n	λ	M _n	ΦM _n
in ⁴	in ⁴	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	Ala			Ksi	Alma					Ksi	in-k	in-k		in-k	in-k
1.13	1.70	44.74	53.21	53.21	40.27	53.69	40.27	11.5	22.9	39.3	25.0	28.8	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	44.75	40.27	15.90	40.36	36.32
		40.27	47.89	47.89				b/t= 11.5	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 28.8	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	

Resistencia de Diseño a Cortante

13.1 Kip		0.0 Ton		E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura								E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo			
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n						
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K						
1.04	0.97	17.5032	13.13	28.8	39.0	76	15.0	15.6	14.0						
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia								

Diseño de Arriostres - Techo #1 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.13	in
b	1.75	in
d	4	in
Longitud	1.15	m
Longitud	1.15	m
LTB	1.15	m
P	4.13	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Díametro	0.375	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3800	

	0.13	A	1.43	S _x	1.42
	1.75	I _x	2.84	S _y	0.86
	4.00	I _y	0.76	J	1.86
	1.49	r _x	1.41	C _w	0.00
	3.74	r _y	0.73	Z _x	1.79

Resistencia de Diseño a Tensión

29.7 K		13.5 Ton									
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo Último						
Díametro in	F _t Ksi	A _n in ²	P _t Kips	ΦP _t K	F _u Ksi	K _t	A _e in ²	P _t K	ΦP _t K		
0.38	25	1.43	35.69	32.1	30	1	1.32	39.65	29.74		

Resistencia de Diseño a Compresión

21.2 K		9.6 Ton										E.L.#2 Pandeo Local										Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local		
E.L.#1 Pandeo Global					E.L.#2 Pandeo Local																			
Long (in)	L _c /r _x	L _c /r _y	λ	F _e Ksi	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi	P _n K	b/t Ala	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c Ksi	b/t Alma	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi	F _e Ksi	A _r in ²	A _w in ²	P _n K	Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local	
45.28	32.11	62.23	7.12	1968.6	17.9	78.0	16.52	23.58	11.5	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	296.4	28.8	22.9	39.3	23.3	47.05	0.4	1.0	34.08	No aplica
			λ = 62.23	Pandeo Inelástico		Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φPn 21.2	b/t= 11.5	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10,15.11 y 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	28.77	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Pandeo Inelástico	Pandeo Elástico		φPn 30.7	

Resistencia de Diseño a Flexión

36.1 k-in		E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura					E.L.#3 Pandeo Local					E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional					
L _w in ⁴	I _x in ⁴	M _w in-k	M _u in-k	M _u in-k	ΦM _u in-k	M _u in-k	ΦM _u in-k	b/t Ala	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi	b/t Alma	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _b Ksi	M _u in-k	ΦM _u in-k	λ	M _u in-k	ΦM _u in-k
1.13	1.70	44.74	53.21	53.21	40.27	53.69	40.27	11.5	22.9	39.3	25.0	28.8	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	44.75	40.27	16.93	40.08	36.07
			40.27	47.89	47.89			b/t= 11.5	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 28.8	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	

Resistencia de Diseño a Cortante

13.1 Kip		5.0 Ton									
E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura					E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo						
A _v in ²	A _n in ²	V _n K	ΦV _n K	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v Ksi	V _n K	ΦV _n K		
1.04	0.97	17.5032	13.13	28.8	39.0	76	15.0	15.6	14.0		
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia				

Diseño de Cuerda Superior - Techo #2 - Aluminio

Datos del perfil	
t	0.39 in
b	3 in
d	6.5 in
Longitud	1.52 m
Longitud	1.52 m
LTB	1.52 m
P	15.08 Ton
Diseño satisfactorio	

Datos de Conexión	
# Agujeros T	2
Diámetro	0.5 in

Aleación	6063 T6
Fty	25 ksi
Fcy	25 ksi
Ftu	30 ksi
Fsy	15 ksi
Fsu	18 ksi
E	10100 ksi
K _x	1
K _y	1
G	3800

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _y	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _x	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

Resistencia de Diseño a Tensión		143.7 K		65.2 Ton							
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia						E.L.#2 Esfuerzo Último					
Diámetro in	F _t Ksi	A _n in ²	P _t Kips	ΦP _t K	F _u Ksi	K _t	A _e in ²	P _t K	ΦP _t K		
0.50	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.39	191.62	143.71		

Resistencia de Diseño a Compresión		113.6 K		51.5 Ton																					
E.L.#1 Pandeo Global						E.L.#2 Pandeo Local												Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local							
Long (in)	Elemento	L _f /r _x	L _f /r _y	λ	F _e Ksi	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi	P _n K	b/t Ala	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c Ksi	F _e Ksi	b/t Alma	λ ₁	λ ₂	F _c Ksi	F _e Ksi	A _r in ²	A _w in ²	P _n K	
59.84		26.75	50.88	7.08	1989.8	17.9	78.0	18.56	126.23	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica
59.84		λ = 50.88		Pandeo Inelástico	Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φP _n 113.6	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φP _n 153.0		

Resistencia de Diseño a Flexión		275.5 k-in		3.17 Ton																		
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia						E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura						E.L.#3 Pandeo Local						E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional				
I _x in ⁴	I _y in ⁴	M _u in-k	M _u in-k	M _u in-k	ΦM _u in-k	M _u in-k	ΦM _u in-k	b/t Ala	λ ₁	λ ₂	F _t Ksi	b/t Alma	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _t Ksi	M _u in-k	ΦM _u in-k	λ	M _u in-k	ΦM _u in-k
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	15.05	306.06	275.45
		304.40	353.43	353.43				b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	

Resistencia de Diseño a Cortante		60.2 Kip		27.3 Ton							
E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura						E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo					
A _v in ²	A _w in ²	V _u K	ΦV _u K	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v Ksi	V _u K	ΦV _u K		
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4		
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia				

Diseño de Cuerda Inferior - Techo #2 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.39	in
b	3	in
d	6.5	in
Longitud	1.00	m
Longitud	1.00	m
LTB	1.00	m
P	6.34	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Díametro	0.5	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3800	

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _y	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _x	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

Resistencia de Diseño a Tensión		143.7 K		65.2 Ton							
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia						E.L.#2 Esfuerzo Último					
Díametro	F _t	A _n	P _t	ΦP _t	F _u	K _c	A _e	P _t	ΦP _t		
in	Ksi	in ²	Kips	K	in ²		K	K	K		
0.50	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.39	191.62	143.71		

Resistencia de Diseño a Compresión		133.8 K		60.7 Ton																					
E.L.#1 Pandeo Global						E.L.#2 Pandeo Local												Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local							
Long (in)	Elemento	L _c /r _x	L _c /r _y	λ	F _e	λ ₁	λ ₂	F _c	P _n	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	F _e	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	
				$\lambda = \sqrt{\frac{F_e}{F_c}}$	Ksi	$\lambda = \frac{b \cdot t}{r}$	$\lambda_1 = C$	Ksi	K	Ala					Ksi	Ksi	Alma			Ksi	Ksi	in ²	in ²	K	
39.37					1989.8	17.9	78.0	21.86	148.71	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica
39.37		17.60	33.47	7.08																					
		λ = 33.47			Pandeo Inelástico	Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φP _n 133.8	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φP _n 153.0	

Resistencia de Diseño a Flexión		280.9 k-in		3.24 Ton																		
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia						E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura						E.L.#3 Pandeo Local						E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional				
I _x	I _y	M _{px}	M _{py}	M _{px}	ΦM _{px}	M _{ux}	ΦM _{ux}	b/t	λ ₁	λ ₂	F _t	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _t	M _{px}	ΦM _{ux}	λ	M _{px}	ΦM _{ux}
in ⁴	in ⁴	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	Ala			Ksi	Alma					Ksi	in-k	in-k		in-k	in-k
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	12.21	312.13	280.92
		304.40	353.43	353.43				b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	






Resistencia de Diseño a Cortante		60.2 Kip		27.3 Ton							
E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura						E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo					
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n		
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K		
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4		
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia				

Diseño de Cuerda Inferior - Techo #3 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.39	in
b	3	in
d	6.5	in
Longitud	1.00	m
Longitud	1.00	m
LTB	1.00	m
P	9.73	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Díametro	0.625	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3800	

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _x	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _y	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

Resistencia de Diseño a Tensión

141.5 K		64.2 Ton		E.L.#2 Esfuerzo Último							
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia				E.L.#2 Esfuerzo Último							
Díametro	F _t	A _n	P _t	ΦP _t	F _u	K _c	A _e	P _t	ΦP _t		
in	Ksi	in ²	Kips	K	in ²		K	K	K		
0.63	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.29	188.69	141.52		

Resistencia de Diseño a Compresión

133.8 K		60.7 Ton		E.L.#1 Pandeo Global										E.L.#2 Pandeo Local								Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local			
Long (in)	Elemento	L _c /r _x	L _c /r _y	λ	F _e	λ ₁	λ ₂	F _c	P _n	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	F _e	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	
39.37				$\lambda = \sqrt{\frac{F_c}{F_e}}$	$\lambda = \sqrt{\frac{F_c}{F_e}}$	$\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{E}{K}}$	$\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{E}{K}}$	$\lambda_1 = C$	$\lambda_2 = C$						$\lambda_1 = 0.7$	$\lambda_2 = 0.7$									
39.37		17.60	33.47	7.08	1989.8	17.9	78.0	21.86	148.71	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica
		λ = 33.47		Pandeo Inelástico		Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φP _n 133.8	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en Compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φP _n 153.0	

Resistencia de Diseño a Flexión

280.9 k-in		124 Ton		E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia				E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura				E.L.#3 Pandeo Local						E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional				
I _x	I _y	M _y	M _x	M _y	ΦM _y	M _u	ΦM _u	b/t	λ ₁	λ ₂	F _t	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _t	M _u	ΦM _u	λ	M _u	ΦM _u
in ⁴	in ⁴	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	Ala			Ksi	Ala					Ksi	in-k	in-k		in-k	in-k
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	12.21	312.13	280.92
		304.40	353.43	353.43				b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	

Resistencia de Diseño a Cortante

60.2 Kip		27.3 Ton		E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura								E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo							
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n					
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K			Ksi	K	K					
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4			Fluencia							
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia												

Diseño de Arriostres - Techo #3 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.39	in
b	3	in
d	6.5	in
Longitud	3.00	m
Longitud	3.00	m
LTB	3.00	m
P	4.00	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Díametro	0.625	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3900	

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _y	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _x	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

Resistencia de Diseño a Tensión									
141.5 K 64.2 Ton									
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo Último				
Díametro	F _t	A _n	P _t	ΦP _t	F _t	K _c	A _n	P _t	ΦP _t
in	Ksi	in ²	Kips	K	Ksi		in ²	K	K
0.63	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.29	188.69	141.52

Resistencia de Diseño a Compresión										Resistencia de Diseño a Flexión										Resistencia de Diseño a Torsión																			
51.4 K 23.3 Ton										E.L.#1 Pandeo Global										E.L.#2 Pandeo Local										Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local									
Long (in)	L _x /r _x	L _y /r _y	λ	F _e	λ ₁	λ ₂	F _c	P _n	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	F _e	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	Interacción															
Elemento			$\lambda = \sqrt{\frac{F_e}{F_c}}$	Ksi	$\lambda = \frac{r_c}{r_x}$	$\lambda = \frac{r_c}{r_y}$	Ksi	K	Ala					Ksi	Ksi	Alma			Ksi	Ksi	in ²	in ²	K																
118.11	52.80	100.42	7.08	1989.8	17.9	78.0	8.40	57.15	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica															
118.11	λ = 100.42		Pandeo Elástico	Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φPn 51.4	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.18 y 19.		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φPn 153.0																	

Resistencia de Diseño a Flexión										Resistencia de Diseño a Torsión																			
263.7 k-in 3.04 Ton										E.L.#3 Pandeo Local										E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional									
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura					E.L.#3 Pandeo Local					E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional														
I _x	I _y	M _{px}	M _{py}	M _{px}	M _{py}	M _{px}	M _{py}	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	M _{px}	M _{py}	λ	M _{px}	M _{py}							
in ⁴	in ⁴	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	Ala			Ksi	Alma					Ksi	in-k	in-k		in-k	in-k							
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	21.15	293.04	263.74							
		304.40	353.43	353.43				b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0								

Resistencia de Diseño a Cortante									
60.2 Kip 7.3 Ton									
E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura					E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo				
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia		

Diseño de Cuerda Superior - Techo #4 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.39	in
b	3	in
d	6.5	in
Longitud	2.54	m
Longitud	1.34	m
LTB	17.68	m
P _c	26.84	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros	2	
Díametro	0.75	in

Aleación	6063 T6	
F _{ty}	25	ksi
F _{cy}	25	ksi
F _{tu}	30	ksi
F _{sy}	15	ksi
F _{su}	18	ksi
E	10100	ksi
K _c	1	
G	3800	

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _x	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _y	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

Resistencia de Diseño a Tensión									
139.3 K		63.2 Ton							
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo Último				
Díametro	F _t	A _n	P _c	ΦP _n	F _u	K _c	A _e	ΦP _e	
in	Ksi	in ²	Kips	K	in ²		K	K	
0.75	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.19	185.77	139.33

Resistencia de Diseño a Compresión		E.L.#1 Pandeo Global														E.L.#2 Pandeo Local								Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local	
120.6 K		54.7 Ton																							
Long (in)	Elemento	L _f /r _x	L _f /r _y	λ	F _e	λ ₁	λ ₂	F _c	P _n	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	F _e	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	Interacción
44.88	100.00			$\lambda = \sqrt{\frac{F_e}{F_c}}$	Ksi	$\lambda = \frac{r_2}{r_1}$	$\lambda_1 = C$	Ksi	K	Ala					Ksi	Ksi	Alma			Ksi	Ksi	in ²	in ²	K	
		44.70	38.16	7.08	1989.8	17.9	78.0	19.71	134.03	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica
		λ = 44.70		Pandeo Inelástico	Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φP _n 120.6	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φP _n 153.0		

Resistencia de Diseño a Flexión		E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura				E.L.#3 Pandeo Local						E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional					
220.8 k-in		2.54 Ton																				
I _x	I _y	M _n	M _{pn}	M _{pn}	ΦM _n	M _u	ΦM _u	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	M _{pn}	ΦM _u	λ	M _{pn}	ΦM _u
in ⁴	in ⁴	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	in-k	Ala			Ksi	Alma					Ksi	in-k	in-k		in-k	in-k
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	43.48	245.33	220.80
		304.40	353.43	353.43				b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0	

Resistencia de Diseño a Cortante		E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura											E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo				
60.2 Kip		27.3 Ton															
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n								
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K								
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4								
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia										

Diseño de Cuerda Inferior - Techo #4 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.39	in
b	3	in
d	6.5	in
Longitud	0.75	m
Longitud	0.75	m
LTB	0.75	m
P	15.60	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Diámetro	0.75	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _s	1	
G	3800	

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _y	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _x	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

Resistencia de Diseño a Tensión									
139.3 K		63.2 Ton							
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo Último				
Diámetro	F _t	A _n	P _t	ΦP _t	F _u	K _s	A _s	ΦP _s	
in	Ksi	in ²	Kips	K	in ²		K	K	
0.75	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.19	185.77	139.33

Resistencia de Diseño a Compresión		E.L.#1 Pandeo Global														E.L.#2 Pandeo Local								Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local				
144.0 K		65.3 Ton																										
Long (in)	Elemento	L _c /r _x	L _c /r _y	λ	F _e	λ ₁	λ ₂	F _c	P _n	b/t	Ala	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	F _e	b/t	Alma	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	K	Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local
29.53		13.20	25.10	7.08	1989.8	17.9	78.0	23.53	160.05	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04		No aplica		
		λ = 25.10		Pandeo Inelástico	Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φP _n 144.0	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φP _n 153.0					

Resistencia de Diseño a Flexión		E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura				E.L.#3 Pandeo Local								E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional					
284.1 k-in		3.27 Ton																						
L _c	I _x	M _n	M _u	M _p	ΦM _n	M _n	ΦM _u	b/t	Ala	λ ₁	λ ₂	F _t	b/t	Alma	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _t	M _u	ΦM _u	λ	M _u	ΦM _u
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	10.57	315.63	284.07		
		304.40	353.43	353.43				b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia				Cc= 78.0	Cb= 1.0		

Resistencia de Diseño a Cortante		E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura		E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo							
60.2 Kip		27.3 Ton									
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n		
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K		
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4		
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia				

Diseño de Arriostres - Techo #4 - Aluminio

Datos del perfil		
t	0.39	in
b	3	in
d	6.5	in
Longitud	3.27	m
Longitud	3.27	m
LTB	3.27	m
P	4.3	Ton
Diseño satisfactorio		

Datos de Conexión		
# Agujeros T	2	
Díametro	0.75	in

Aleación	6063 T6	
Fty	25	ksi
Fcy	25	ksi
Ftu	30	ksi
Fsy	15	ksi
Fsu	18	ksi
E	10100	ksi
K _x	1	
G	3800	

	0.39	A	6.80	S _x	10.47
	3.00	I _x	34.03	S _y	6.27
	6.50	I _y	9.41	J	22.75
	2.22	r _x	2.24	C _w	0.00
	5.72	r _y	1.18	Z _x	13.53

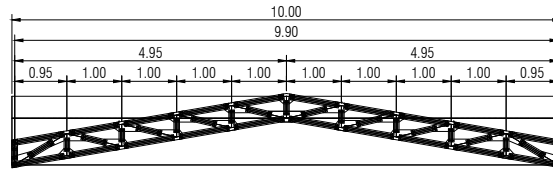
Resistencia de Diseño a Tensión									
139.3 K					63.2 Ton				
E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia					E.L.#2 Esfuerzo Último				
Díametro	F _t	A _n	P _t	ΦP _t	F _u	K _c	A _e	P _t	ΦP _t
in	Ksi	in ²	Kips	K	in ²		in ²	K	K
0.75	25	6.80	170.04	153.0	30	1	6.19	185.77	139.33

Resistencia de Diseño a Compresión										E.L.#1 Pandeo Global														E.L.#2 Pandeo Local								Interacción entre Pandeo Global y Pandeo Local					
43.3 K					19.6 Ton					F _c		F _e		b/t		λ ₁		λ ₂		F _c		b/t		λ ₁		λ ₂		F _c		F _e		A _r		A _w		P _n	
Long (in)	L _x /r _x	L _y /r _y	λ	F _c	λ ₁	λ ₂	F _e	P _n	b/t	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	λ ₁	λ ₂	F _c	b/t	λ ₁	λ ₂	F _c	F _e	A _r	A _w	P _n	Interacción												
Elemento			$\lambda = \sqrt{\frac{F_c}{F_e}}$	Ksi	$\lambda = \frac{r_c}{r_x}$	$\lambda = \frac{r_c}{r_y}$	Ksi	K	Ala							Ksi	Alma			Ksi	Ksi	in ²	in ²	K													
128.74				1989.8	17.9	78.0	7.07	48.11	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica													
128.74	57.55	109.45	7.08	1989.8	17.9	78.0	7.07	48.11	5.7	22.9	39.3	0.35	2.27	25.0	1201.7	14.7	22.9	39.3	25.0	181.02	1.7	4.5	170.04	No aplica													
	λ = 109.45			Pandeo Elástico		Bc= 27.6	Dc= 0.1	Cc =78.00	φPh 43.3	b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Elementos en compresión para ejemplo 15.10, 15.11, 15.19		Fluencia	Pandeo Elástico	14.67	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	Pandeo Elástico			φPh 153.0													

Resistencia de Diseño a Flexión										E.L.#1 Esfuerzo de Fluencia														E.L.#2 Esfuerzo de Ruptura								E.L.#3 Pandeo Local								E.L.#4 Pandeo Lateral-Torsional			
261.9 k-in					130.95 Ton-m					M _u		M _u		b/t		λ ₁		λ ₂		F _c		M _u		ΦM _u		λ		M _u		ΦM _u													
L _x	I _x	M _u	M _u	λ	M _u	λ ₁	λ ₂	F _c	b/t <th>λ₁</th> <th>λ₂</th> <th>k₁</th> <th>k₂</th> <th>F_c</th> <th>M_u</th> <th>ΦM_u</th> <th>λ</th> <th>M_u</th> <th>ΦM_u</th>	λ ₁	λ ₂	k ₁	k ₂	F _c	M _u	ΦM _u	λ	M _u	ΦM _u																								
in ⁴	in ⁴	in-k	in-k		in-k			Ksi	Ala					Ksi	in-k	in-k		in-k	in-k																								
12.16	21.87	338.22	392.70	392.70	304.40	405.86	304.40	5.7	22.9	39.3	25.0	14.7	34.6	92.8	0.5	2.04	37.5	338.46	304.62	22.08	291.05	261.95																					
		304.40	353.43	353.43					b/t= 5.7	Bp= 31.4	Dp= 0.2	Fluencia	b/t= 14.7	Bb= 46.1	Db= 0.4	Elementos en Flexión		Fluencia			Cc= 78.0	Cb= 1.0																					

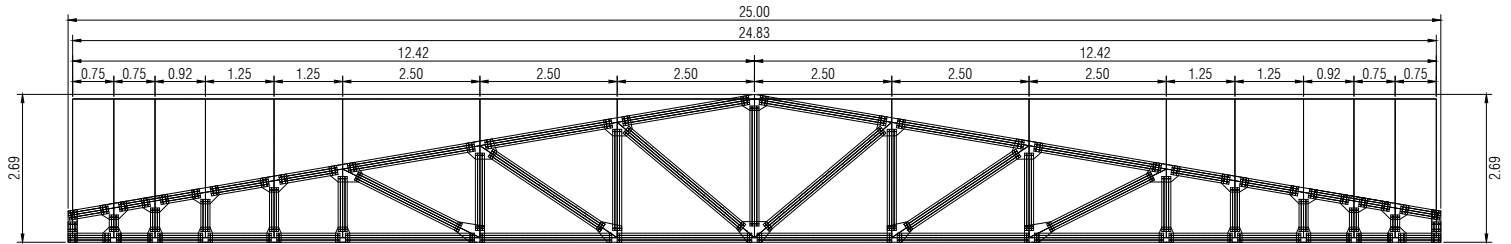
Resistencia de Diseño a Cortante									
60.2 Kip					27.3 Ton				
E.L.#1 Esfuerzo de Ruptura					E.L.#2 Esfuerzo de Fluencia y Pandeo				
A _v	A _n	V _n	ΦV _n	b/t	λ ₁	λ ₂	F _v	V _n	ΦV _n
in ²	in ²	K	K				Ksi	K	K
5.07	4.46	80.3088	60.23	14.7	39.0	76	15.0	76.1	68.4
				Bs= 19.0	Ds= 0.1	Cs= 95.0	Fluencia		

ANEXO 2



TODAS LAS PLACAS A UTILIZAR SERAN A36 DE 5mm
 TODOS LOS PERNOS A UTILIZAR SERAN A307 DE 3/8

CERCHA #1 - 10metros
 ESCALA 1:25



TODAS LAS PLACAS A UTILIZAR SERAN A36 DE 6mm
 TODOS LOS PERNOS A UTILIZAR SERAN A307 DE 3/4

CERCHA #4 - 25metros
 ESCALA 1:25