



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de Grado

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SOPORTE DE TECHO (LARGUEROS) PARA
NAVES INDUSTRIALES DE CONCRETO PREFABRICADO EN COSTA RICA**

Autora: María Fernanda Alvarado Barquero

Tutor: Ing. Andrés Reyes Bonilla M. Sc

Heredia, julio de 2019



UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SOPORTE DE TECHO (LARGUEROS) PARA NAVES INDUSTRIALES DE CONCRETO PREFABRICADO EN COSTA RICA.", fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

ING. ANDRÉS REYES BONILLA M.SC

TUTOR

ING. OLMAN ELIZONDO ESQUIVEL

LÉCTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

COMITÉ ASESOR

ING. ANDRÉS REYES BONILLA M.SC

TUTOR

ING. OLMAN ELIZONDO ESQUIVEL

LECTOR

ING. SIRLEY ALVAREZ GONZÁLEZ

REPRESENTANTE DE RECTORÍA

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR TUTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 10 de julio, del 2019

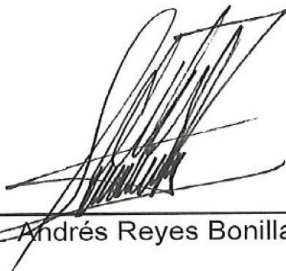
Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título "OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SOPORTE DE TECHO (LARGUEROS) PARA NAVES INDUSTRIALES DE CONCRETO PREFABRICADO EN COSTA RICA" por parte del estudiante: María Fernanda Alvarado Barquero, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la 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,



Ing. Andrés Reyes Bonilla M. Sc

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL PROFESOR LECTOR DEL
TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD TESIS DE GRADO**

Heredia, 10 de julio, del 2019

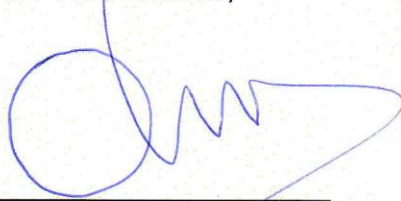
Sres.
Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, modalidad Tesis de Grado bajo el título "OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SOPORTE DE TECHO (LARGUEROS) PARA NAVES INDUSTRIALES DE CONCRETO PREFABRICADO EN COSTA RICA" por parte del estudiante: María Fernanda Alvarado Barquero, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la 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,



Ing. Olman Elizondo Esquivel

29 de julio 2019

Señores

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Información

Estimados señores:

Hago constar que la estudiante María Fernanda Alvarado Barquero, con número de cédula 115720805, me ha presentado para corrección filológica la Tesis de Ingeniería Civil titulada **Optimización del sistema de soporte de techo (largueros) para naves industriales de concreto prefabricado en Costa Rica.**

A este respecto, me permito expresar que he corregido los aspectos concernientes a la estructura gramatical, ortografía, vocabulario equivocado, puntuación, vicios de estilo, repeticiones innecesarias, párrafos oscuros, contradicciones etc., y he comprobado que las correcciones y sugerencias hechas por mi persona, han sido incorporadas al documento en mención.

Por lo tanto, hago constar que esta Tesis de Graduación reúne las condiciones de un documento, para ser presentado a la Universidad Latina.



Jorge Fernández Chaves
Filólogo - Carné Colypro 02545



“Carta Autorización del autor(es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Alvarado Barquero, María Fernanda

De la Carrera / Programa: Ingeniería Civil

autor (es) del (de la) *(Indique tipo de trabajo):* Tesis de Grado
titulado:

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE SOPORTE DE TECHO (LARGUEROS) PARA NAVES INDUSTRIALES DE CONCRETO PREFABRICADO EN COSTA RICA

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página web institucional, así como medios electrónicos en general, internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos dentro o fuera de la Red Laureate, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de esta.

La presente autorización se extiende el día *(Día, fecha)* 24 del mes julio del año 2019 a las 5:00 p.m. . Asimismo declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: que soy el autor(a) del presente trabajo final de graduación, que el contenido de dicho trabajo es obra original del (la) suscrito(a) y de la veracidad de los datos incluidos en el documento. Eximo a la Universidad Latina; así como al Tutor y Lector que han revisado el presente, por las manifestaciones y/o apreciaciones personales incluidas en el mismo, de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjurio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores *Según orden de mención al inicio de ésta carta:*

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Gilberto y Elena por tanto amor, comprensión y apoyo constante, por el esfuerzo real que han realizado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida, por ser un ejemplo de humildad, trabajo y fe en Dios.

Al profesor Ing. Andrés Reyes por su acertada guía, su dedicación para con mi proyecto, su experiencia, apoyo, conocimiento, criterio y la confianza puesta en mí persona para concretarlo con éxito.

En general, a mi Comité Asesor, gracias por la confianza, los conocimientos y criterios transmitidos, paciencia y atención, los tres son un ejemplo para seguir.

RESUMEN

Actualmente la empresa Productos de Concreto en Costa Rica construye naves industriales utilizando como restricción largueros de 12 metros, 35 kg/m² de carga permanente y 40 kg/m² de carga temporal. Debido a la alta demanda en el sector industrial y sus requerimientos, se crea la necesidad de construir naves con mayor longitud entre marcos soportantes y modificar las cargas de diseño.

Una geometría triangular y / o trapezoidal en el sistema de soporte de techo es una alternativa viable para la construcción de longitudes superiores a 12 metros en naves industriales de concreto prefabricado.

El objetivo principal es optimizar un sistema de soporte de techo para la construcción de naves industriales de concreto prefabricado en Costa Rica. Además de analizar cargas y condiciones críticas de diseño, diseñar tres propuestas alternativas, preparar un análisis de desempeño estructural y costos económicos para cada propuesta, asimismo proponer dos soluciones de cubierta de techo.

Con el fin de determinar el soporte de techo óptimo, se realiza un análisis estructural con tres alternativas geométricas, cada una se evalúa en longitudes de doce, catorce y dieciséis metros y se valoran tres combinaciones de carga distintas.

Luego de los análisis estructurales cuantitativos realizados se obtienen valores de carga satisfactorios, por tanto, se afirma que la hipótesis planteada en este estudio es verdadera.

Además, mediante los análisis estructurales y económicos efectuados se obtiene que el caso uno es la propuesta idónea para el sistema de soporte de techo en naves industriales de concreto prefabricado en Costa Rica.

Palabras clave: larguero, industrial, triangular, trapezoidal, análisis, diseño, soporte, techo.

Abstract

Currently, the company Productos de Concreto in Costa Rica builds industrial buildings using a roof beam restriction of 12 meters, 35 kg/m² of permanent load and 40 kg/m² of temporary load. Due to the high demand in the industrial sector and its requirements, the need to build industrial buildings with greater length between supporting frames and modify design loads is created.

A triangular and / or trapezoidal geometry in the roofing support system is a viable alternative for the construction of lengths greater than 12 meters in industrial prefabricated concrete buildings.

The main objective is to optimize the roofing support system for the construction of prefabricated concrete industrial buildings in Costa Rica. In addition to analyze loads and critical design conditions, design three alternative proposals, prepare an analysis of structural performance and economic costs for each proposal, also propose two solutions roof cover.

In order to determine the optimum ceiling support, a structural analysis is carried out with the geometric alternatives, each time it is evaluated in lengths of twelve, fourteen and sixteen meters and the different loading options are evaluated.

After the quantitative structural analyzes performed satisfactory load values are obtained, therefore, it is affirmed that the hypothesis proposed in this study is true.

Furthermore, through the structural and economic analyzes carried out, case one is the ideal proposal for the ceiling support system in prefabricated concrete industrial buildings in Costa Rica.

Keywords: industrial, roof beam, triangular, trapezoidal, optimize, analysis, roofing support.

ÍNDICE GENERAL

1.1.	Antecedentes	21
1.2.	Planteamiento del problema de investigación	22
1.3.	Hipótesis.....	23
1.4.	Objetivo general	23
1.5.	Objetivos específicos.....	23
1.6.	Justificación.....	24
1.7.	Alcance y limitaciones	25
1.8.	Impacto.....	26
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO		27
2.1	Naves industriales	27
2.2	Soporte de techo (larguero).....	28
2.1.1	Tipos de soportes de techo.....	28
2.1.2	Materiales utilizados en la construcción de soportes de techo	30
2.3	Estados de esfuerzo	37
2.3.1	Esfuerzo por carga axial.....	38
2.3.2	Esfuerzo por carga cortante	39
2.3.3	Esfuerzos por momento flector.....	40
2.3.4	Esfuerzos combinados de cortante y momento flector	40
2.4	Metodologías de diseño.....	41
2.4.1	Diseño por esfuerzos permisibles (A.S.D. por sus siglas en inglés).....	41
2.4.2	Método de factores de carga y resistencia (L.R.F.D. por sus siglas en inglés).....	41
CAPÍTULO II. MARCO METODOLÓGICO		43
3.1	Paradigma, enfoque metodológico y método (s) de investigación propuestos	43
3.2	Categorías de análisis de la investigación (operación de variables)	43

3.2.1	Procedimiento para propuesta de diseño estructural.....	44
3.3	Población y muestra	59
3.4	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	63
3.4.1	Procedimientos específicos.....	63
3.4.2	<i>Softwares</i>	79
3.5	Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de datos.....	79
3.6	Cronograma de trabajo.....	81
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		82
4.1	Resultados del diseño estructural: propuestas alternativas para el sistema de largueros en naves industriales de concreto prefabricado.....	82
4.1.1	Caso 1.....	82
4.1.2	Caso 2.....	90
4.1.3	Caso 3.....	97
4.2	Análisis de resultados: comparativo de desempeño estructural para cada una de las propuestas alternativas de sistemas de largueros para naves industriales de concreto prefabricado.....	108
4.3	Análisis de resultados: comparativo de costos económicos para cada una de las propuestas estructuralmente factibles de sistemas de largueros para naves industriales de concreto prefabricado.....	119
4.5	Planteamiento de soluciones para cubierta de techo.....	149
CONCLUSIONES		153
RECOMENDACIONES.....		158
REFERENCIAS.....		160
ANEXOS		162
Anexo A		162
Anexo B.....		167

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Larguero “T” dimensionamiento	21
Fig. 2 Larguero “T” sección variable.....	21
Fig. 3 Detalle ubicación soporte de techo en naves industriales.....	22
Fig. 4 Estructura típica de nave industrial de concreto.	27
Fig. 5 Larguero de acero para techos. (a) larguero compuesto por un perfil de sección Z. (b) Larguero de alma abierta, compuesto por angulares y varillas.....	28
Fig. 6 Detalle larguero de alma llena.	29
Fig. 7 Detalle de larguero de alma abierta.	29
Fig. 8 Perfiles doblados en frío.	34
Fig. 9 Diseño sin agrietar de elementos preesforzados para cargas de servicio1.	35
Fig. 10 Pasos sucesivos en la determinación del esfuerzo normal máximo en una barra cargada axialmente.	38
Fig. 11 Distribución de esfuerzos en la respuesta mecánica a la compresión.	39
Fig. 12. Distribución general de esfuerzo por momento flector.	40
Fig. 13. Ejemplo de diagramas de fuerza cortante y momento flexionante para la carga mostrada.	41
Fig. 14. Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas para el sistema de soporte de techo.	44
Fig. 15 Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas del caso 1.....	45
Fig. 16 Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas del caso 2.....	45
Fig. 17 Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas del caso 3.....	46
Fig. 18 Soporte de techo para la propuesta del caso 1, longitud variable.....	47
Fig. 19 Perspectiva de soporte de techo para el caso 1, longitud variable con condiciones de apoyo.	47
Fig. 20. Soporte de techo para la propuesta del caso 2, longitud variable.....	49
Fig. 21. Perspectiva de soporte de techo para el caso 2, longitud variable con condiciones de apoyo.	49
Fig. 22. Marco típico con vigas de alma abierta y pendiente del 14% en techos.	50

Fig. 23 Soporte de techo para la propuesta del caso 3, longitud variable.....	51
Fig. 24 Perspectiva de soporte de techo para el caso 3, longitud variable con condiciones de apoyo.	51
Fig. 25 Geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 1 y 2.....	52
Fig. 26 Geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 3.....	53
Fig. 27. Modelo de optimización para el diseño final del sistema de soporte de techo.....	55
Fig. 28. Separación del refuerzo por retracción de fraguado y temperatura en losas.	56
Fig. 29 Separación máxima del refuerzo en losas reforzadas.	57
Fig. 30. Esquema de experimento de las variables.	62
Fig. 31 Software de trabajo SAP 2000.....	79
Fig. 32 Cronograma.	81
Fig. 33 Diseño geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 1.	82
Fig. 34. Diseño soporte de techo para la propuesta 1 del caso 1, longitud variable.	84
Fig. 35 Perspectiva de soporte de techo para el caso 1 con carga axial aplicada, longitud variable con condiciones de apoyo.	84
Fig. 36 Diseño geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 2	90
Fig. 37. Perspectiva de soporte de techo para el caso 2, longitud variable con condiciones de apoyo.	91
Fig. 38. Diseño soporte de techo para la propuesta 1 del caso 2, longitud variable.	91
Fig. 39 Diseño geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 3.	97
Fig. 40 Diseño soporte de techo para la propuesta del caso 3, longitud variable.	98
Fig. 41 Perspectiva de soporte de techo para el caso 3, longitud variable con condiciones de apoyo.	98
Fig. 42. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 1.	109
Fig. 43. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 1.	110
Fig. 44. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 2.	111
Fig. 45. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 2.	112

Fig. 46. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 3.	113
Fig. 47. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 3.	114
Fig. 48. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para los casos 1, 2 y 3.....	116
Fig. 49. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para los casos 1, 2 y 3.	118
Fig. 50. Relación de pesos promedio por elemento en Kg / metro lineal en función de la opción propuesta en los casos 1, 2 y 3.....	135
Fig. 51. Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V. = 83,15 kg/m ²	144
Fig. 52. Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V. = 83,15 kg/m ²	145
Fig. 53. Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V. = 83,15 kg/m ²	146
Fig. 54 Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para los casos 1 - 2 – 3.....	148
Fig. 55 Gráfico de eficacia para los sistemas de techo en función de la separación máxima de largueros.....	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Secciones obtenidas de la optimización de largueros de acero de alma llena.	22
Tabla 2 Secciones obtenidas de la optimización de largueros de acero de alma abierta.	22
Tabla 3. Cuantía máxima de refuerzo a flexión, ρ_{max} , para losas reforzadas.	58
Tabla 4 Cuadro comparativo de separación y pesos de las láminas más utilizadas en Costa Rica.	66
Tabla 5. Construcciones situadas en la ciudad o en lugares de rugosidad comparable.	68
Tabla 6. Construcciones en campo abierto frente al mar y sitios similares.	68
Tabla 7. Combinaciones resultantes de la iteración de cargas últimas de acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica 2010.	71
Tabla 8. Resistencia nominal y compresión de tubos cuadrados de acero laminado en caliente. 75	
Tabla 9. Resistencia nominal y compresión de tubos rectangulares de acero laminado en caliente.	76
Tabla 10. Resistencia nominal y compresión de tubos cuadrados de acero laminado en frío. Fuente: Propia.	77
Tabla 11. Resistencia nominal y compresión de tubos rectangulares de acero laminado en frío. 78	
Tabla 12. Cargas axiales críticas en tensión (tubo inferior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 1.....	85
Tabla 13. Cargas axiales críticas en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 1.	85
Tabla 14. Diseño de acero en compresión para el caso 1.	86
Tabla 15. Diseño de acero en tensión para el caso 1.	87
Tabla 16 Diseño optimizado de acero en compresión para el caso 1.	88
Tabla 17 Diseño optimizado de acero en tensión para el caso 1.	89
Tabla 18. Cargas axiales críticas en tensión (tubo inferior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 2.....	92

Tabla 19 Cargas axiales críticas en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 2.	92
Tabla 20. Diseño de acero en compresión para el caso 1.	93
Tabla 21. Diseño de acero en tensión para el caso 1.	94
Tabla 22 Diseño optimizado de acero en compresión para el caso 2.	95
Tabla 23 Diseño optimizado de acero en tensión para el caso 2.	96
Tabla 24. Cargas axiales críticas en tensión (tubo inferior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 3.....	99
Tabla 25 Cargas axiales críticas en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 3.	99
Tabla 26 Cargas momento máximo crítico en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 3.....	100
Tabla 27. Diseño de acero en tensión para el caso 3.	101
Tabla 28 Diseño optimizado de acero en tensión para el caso 3.	102
Tabla 29 Obtención de la cuantía de refuerzo a flexión.	106
Tabla 30 Resumen diseño de losa reforzada.....	107
Tabla 31. Demanda de carga en tensión para el caso 1.	109
Tabla 32. Demanda de carga en compresión para el caso 1.	110
Tabla 33. Demanda de carga en tensión para el caso 2.	111
Tabla 34. Demanda de carga en compresión para el caso 2.	112
Tabla 35. Demanda de carga en tensión para el caso 3.	113
Tabla 36. Demanda de carga en compresión para el caso 3.	114
Tabla 37. Demandas de cargas obtenidas en tensión para los casos 1, 2 y 3.....	115
Tabla 38. Demandas de cargas obtenidas en compresión para los casos 1, 2 y 3.....	117
Tabla 39. Costos sin optimizar relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 1.	121
Tabla 40. Costos sin optimizar relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 1.	122
Tabla 41. Costos sin optimizar relacionados con los tubos de amarre del caso 1.	123

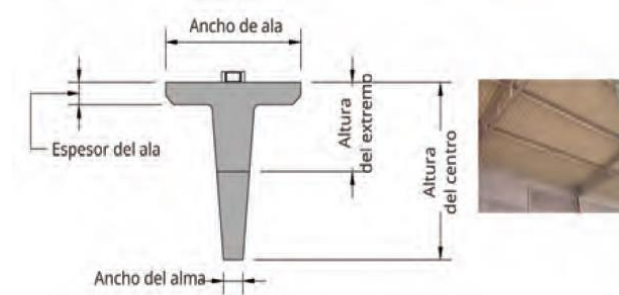
Tabla 42. Resumen de costos sin optimizar del caso 1.....	124
Tabla 43. Costos sin optimizar relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 2.	126
Tabla 44. Costos sin optimizar relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 2.	127
Tabla 45. Costos sin optimizar relacionados con los tubos de amarre del caso 2.	128
Tabla 46. Resumen costos sin optimizar del caso 2.....	129
Tabla 47. Costos sin optimizar relacionados a la losa superior (zona superior) del caso 3.....	130
Tabla 48. Costos sin optimizar relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 3.	131
Tabla 49. Costos sin optimizar relacionados con los tubos de amarre del caso 3.	132
Tabla 50. Resumen de costos sin optimizar del caso 3.....	133
Tabla 51. Pesos promedio para elementos de soporte de techo kg/m.....	135
Tabla 52. Costos optimizados relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 1.....	136
Tabla 53. Costos optimizados relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 1.	136
Tabla 54. Costos optimizados relacionados con los tubos de amarre del caso 1.....	137
Tabla 55. Resumen de costos optimizados del caso 1.	137
Tabla 56. Costos optimizados relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 2.....	138
Tabla 57. Costos optimizados relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 2.	138
Tabla 58. Costos optimizados relacionados con los tubos de amarre del caso 2.....	139
Tabla 59. Resumen de costos optimizados del caso 2.	139
Tabla 60. Costos sin optimizar relacionados con la losa superior (zona superior) del caso 3....	140
Tabla 61. Costos optimizados relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 3.	141
Tabla 62. Costos optimizados relacionados con los tubos de amarre del caso 3.....	141
Tabla 63. Resumen de costos optimizados del caso 3.	142
Tabla 64. Tabla comparativa de la relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V. = 83,15 kg/m ²	144
Tabla 65. Tabla comparativa de la relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V. = 83,15 kg/m ²	145
Tabla 66. Tabla comparativa de la relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V. = 83,15 kg/m ²	146

Tabla 67 Tabla datos propuesta de costos / metro lineal para los casos 1 - 2 - 3	147
Tabla 68. Tabla comparativa de eficacia para los sistemas de techo en función de longitud libre.	150

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Actualmente la empresa Productos de Concreto S.A. construye naves industriales de concreto prefabricado utilizando soportes de techo (largueros) de concreto pretensado en sección variable tipo “T” como se muestra en la figura 1, 2 y 3, esto solamente se permite para separación entre marcos de 12 metros máximo y entre largueros desde 3,00 metros hasta 3,42 metros como máximo; este tipo de largueros está diseñado para someterse a cargas normales de 35 kg/m² de sobre carga permanente y 40 kg/m² de carga temporal.



Dimensiones (m)	Extremo	Centro
Altura	0.20	0.40
Ancho del alma	Variable	0.05
Ancho del ala	0.35	0.35
Espesor del ala	0.05	0.05

Fig. 1 Larguero “T” dimensionamiento
Fuente: Productos de Concreto S.A., 2018



Fig. 2 Larguero “T” sección variable
Fuente: Productos de Concreto S.A., 2018



Fig. 3 Detalle ubicación soporte de techo en naves industriales

Fuente: Productos de Concreto S.A., 2018

Además, para la cubierta de techo se utiliza láminas de techo tipo canaleta estructural o bandeja cosida con o sin aislamiento.

Por otra parte, en el 2008 en una investigación hecha por el Ing. Ugalde se realizó la optimización en diseño de largueros de acero, al comparar secciones elaboradas a partir de varillas y perfiles “L”, conformando largueros de alma abierta, y largueros de alma llena utilizando perfiles “Z”. De acuerdo con la tabla 1 y 2, el resultado concluyó que, para cualquier caso, los perfiles “Z” cumplen en funcionamiento y economía con un máximo de distanciamiento entre marcos evaluado de 12 metros. (Ugalde, 2008).

Tabla 1 Secciones obtenidas de la optimización de largueros de acero de alma llena.

Luz del larguero (m)	Peralte de la sección (cm)	Ancho del ala (cm)	Espesor del atiesador (cm)	Espesor del perfil Z (cm)	Cantidad de tensores	Peso por área (kg/m ²)
6	20	5	1,5	0,158	1	7,85
9	25	5	1,5	0,238	2	10,4
12	30	7,5	2	0,238	2	12,1

Fuente: (Ugalde, 2008)

Tabla 2 Secciones obtenidas de la optimización de largueros de acero de alma abierta.

Luz del larguero (m)	Sección de la cuerda superior	Sección de la cuerda inferior	Varilla de la diagonal	Peralte de la sección (cm)	Cantidad de riostras	Peso por área (kg/m ²)
6	2"x2"x1/8"	1"x1"x1/8"	#3	26	1	12,2
9	2"x2"x1/8"	1"x1"x1/8"	#3	26	2	12,5
12	2"x2"x1/8"	1"x1"x1/8"	#4	37,1	3	13,4

Fuente: (Ugalde, 2008)

1.2. Planteamiento del problema de investigación

Debido a la alta demanda en el sector industrial, se crea la necesidad de construir naves industriales en concreto prefabricado con mayores luces entre los marcos soportantes; para lo cual se tiene como limitante los elementos de soporte de techo (largueros), los cuales en la

actualidad no pueden superar los 12 metros de longitud debido a los diseños vigentes. Además, debido a las condiciones del mercado nacional, se deben modificar las cargas de diseño de estos, ya que por sus requerimientos actualmente las naves industriales exigen soportar mayor carga en los soportes de techo.

La elaboración de un sistema de soporte de cubierta optimizado (largueros) para uso en naves industriales va a venir a solucionar la deficiencia de opciones constructivas en Costa Rica, modificando la restricción en longitud de los soportes de techo y su capacidad de soporte.

1.3. Hipótesis

La combinación de cargas aplicadas a un sistema de geometría triangular o trapezoidal logra optimizar el sistema de soporte de techo (larguero) en longitudes superiores a los 12 metros en naves industriales de concreto prefabricado para la empresa Productos de Concreto en Costa Rica.

1.4. Objetivo general

Optimizar un sistema de soporte de techo (larguero) para la construcción de naves industriales de concreto prefabricado en Costa Rica.

1.5. Objetivos específicos

- 1.5.1 Analizar cargas y condiciones críticas de diseño usuales en el mercado nacional para sistemas de soporte de techo.
- 1.5.2 Diseñar tres propuestas alternativas de sistemas de largueros para naves industriales, utilizando geometrías triangulares y trapezoidales, variando longitudes y cargas aplicadas.
- 1.5.3 Preparar un análisis comparativo de desempeño estructural para cada una de las propuestas de diseño.
- 1.5.4 Realizar un análisis comparativo de costos para cada una de las propuestas estructuralmente factibles.
- 1.5.5 Proponer dos soluciones de cubierta de techo por utilizar, que cumplan con las normativas para un distanciamiento de tres metros entre largueros.

1.6. Justificación

Actualmente en el mercado nacional se encuentra en auge la construcción o remodelación de naves industriales para uso de industria farmacéutica, hospitalaria, entre otros; las que requieren soportar elementos electromecánicos de gran peso, pero estos también deben ser soportados por los elementos de soporte de techo, lo que genera más carga gravitacional al elemento en mención.

Por lo que establecer un sistema de larguero optimizado para la construcción de naves industriales, evaluado diferentes condiciones críticas dadas en la actualidad como largo, separación y cargas aplicadas a esos componentes, permitirá ampliar las soluciones constructivas de manera óptima.

En Costa Rica, las naves industriales han venido sumando importancia a través de los años, así lo confirma el diario El Financiero: “En el último trimestre de 2018, el sector inmobiliario industrial y de logística creció, aunque con más cautela. Ese ritmo se mantendrá con las empresas de inversión extranjera directa, y con poca participación del empresario nacional.

...En la Gran Área Metropolitana (GAM) están en construcción proyectos que suman 133 300 metros cuadrados (m²), según el reporte *Market Beat Costa Rica Industrial 3T 2018*, de la firma *Cush & Wakefield | AB Advisory*.

Los espacios en construcción se concentran en Alajuela (71 300m²) y Cartago (45 200m²), impulsados en especial por los parques industriales de El Coyol y La Lima., respectivamente...

Los desarrollos de naves industriales y centros logísticos se construyen mayoritariamente con ocupación previa...Sin embargo, sí habrá un incremento en la disponibilidad de espacios clase B y C, pues las empresas buscan reubicación hacia sitios clase A”. (Montero , 2019).

De acuerdo con la nota mencionada anteriormente, se muestra el claro crecimiento del sector industrial en Costa Rica, quienes generalmente trabajan bajo el concepto de grandes naves industriales para colocar sus operaciones y por ello la alta demanda actual.

1.7. Alcance y limitaciones

El presente documento pretende ser una herramienta para el diseño óptimo de soportes de techo (largueros), en el entendido de que permitirá saber cuál elemento utilizar y cuáles son las limitaciones, pero conociendo de antemano distanciamiento y cargas a las cuales debe someterse dicho elemento.

Se realizará un análisis sobre cargas y condiciones críticas de diseño para sistemas de soporte de techo (largueros) mayormente utilizados actualmente en el mercado nacional para uso en naves industriales de concreto prefabricado. Con lo anterior se realizará una matriz comparativa de los casos analizados para evaluar el desempeño tanto estructural como económico de las opciones. Además, se deberá obtener las deformaciones en condición de servicio para cada una de las opciones analizadas y, de esta manera, evaluar las posibles soluciones de láminas de techo por utilizar.

Para el análisis y diseño se utilizará el *software* de diseño estructural SAP 2000, pero cabe recalcar que se realizará un enfoque en cargas gravitacionales y de viento para el diseño utilizando para tal fin los códigos vigentes en Costa Rica. Para efectos de evaluación y diseño, se establece como escenario la zona de El Coyol ubicado en Alajuela, el cual es un territorio con las condiciones más críticas del país en cuanto a vientos y región sísmica; además de ser una zona industrial donde la construcción de naves industriales es propia de ella. No se realizarán pruebas de campo, ensayos, ni pruebas de laboratorio para la comprobación de los resultados, pues serán meramente teóricos.

Para cumplir con los alcances anteriormente mencionados se tomarán en cuenta datos e información previa obtenida por la empresa Productos de Concreto S.A.

Una limitante que se presenta, con respecto al planteamiento de los objetivos, es que se pretende llegar al diseño más económico usando el peso y volumen de los materiales utilizados como variables determinantes. Si bien, esta suposición puede ser aceptable con bastante precisión, no se debe olvidar que un proyecto puede verse afectado por costos de construcción y que pueden verse alterados por tipo de cambio, casa distribuidora, mano de obra, imprevistos, tiempos de ejecución y ensamblaje, entre otros. Por otra parte, tampoco se consideran al detalle

desperdicios de los materiales implementados, por lo que se hace la aclaración del caso para que los profesionales responsables evalúen la influencia de este y otros factores relacionados.

No se considerarán dentro de este documento conexiones con otros elementos estructurales propios de las naves industriales, tales como: vigas, marcos, cerchas, entre otros.

1.8. Impacto

Este proyecto va a tener un impacto teórico, social, económico y ambiental importante, ya que procura optimizar el procedimiento utilizado actualmente para uso de soporte de techo (largueros), ampliando las condiciones en naves industriales de concreto construidas en el mercado nacional.

Teóricamente se realizará un análisis que permita conocer las condiciones constructivas actuales, en cuanto a cargas aplicadas, con ello se diseñará y evaluará un sistema óptimo que posteriormente será aplicado en la industria. La implementación del sistema y su respectiva evaluación permitirán al público en general ampliar sus conocimientos respecto a la materia.

En el aspecto económico, se pretende considerar un sistema que cumpla con los requerimientos estructurales y que, a su vez, resulte económicamente factible, pero dicho aspecto se evaluará mediante una matriz comparativa de costos.

Por otra parte, en materia ambiental, la implementación de un elemento que permita distribuir los marcos estructurales con mayor distancia entre ellos permitirá la reducción del material, al colocarse menor cantidad de estos y, por tanto, la reducción de la huella de carbono que los materiales de construcción por sí mismos aportan al ambiente.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

2.1 Naves industriales

Como su nombre lo expresa, “las naves industriales son edificaciones enfocadas al sector industrial, pues su estructuración amplia las hace idóneas para albergar procesos de producción y almacenamiento, es decir plantas y bodegas”, (Ugalde, 2008, pág. 18). Como se muestra en la figura 4 correspondiente a una estructura típica de nave industrial de concreto.

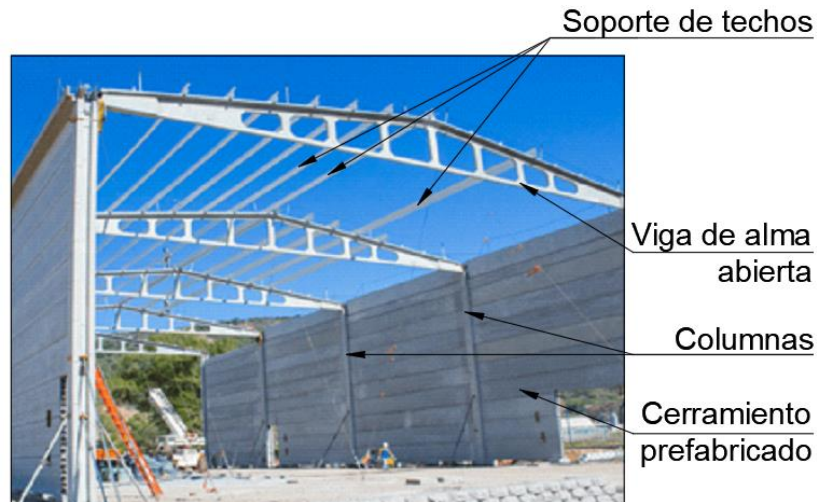


Fig. 4 Estructura típica de nave industrial de concreto.

Fuente: (Arce, Murillo, & Lagos, 2018)

Algunas edificaciones con uso distinto, tales como instalaciones deportivas, supermercados, oficinas y otros son construidos con la misma tipología constructiva, por lo que se les aplica los mismos principios de diseño y el aprovechamiento máximo del espacio interno.

“Las naves industriales son estructuras compuestas básicamente de marcos unidos entre sí por vigas y largueros de techo, se colocan las paredes de cerramiento y cubierta de techo”, (Ugalde, 2008, pág. 18).

Las naves industriales deben resistir cargas gravitacionales y laterales; y estas son las cargas de techo para edificaciones de un solo nivel, como es común para este tipo de inmuebles. Por otra parte, las cargas laterales corresponden a cargas de sismo o viento, que son resistidas por la rigidez propia de los marcos que componen la nave o por sistemas de riostras entre algunos marcos.

La metodología para el diseño de este tipo de estructuras varía según el material por utilizar, ya sea acero, concreto o un híbrido entre ambos materiales mencionados y las fuerzas que actúan sobre la estructura (viento, sismo y gravitacional).

2.2 Soporte de techo (larguero)

“Los largueros son elementos que trabajan básicamente a flexión y que se colocan sobre las vigas o las armaduras del techo de una estructura, a fin de proveer una base para cubierta”, (Ugalde, 2008, pág. 19).

Los largueros normalmente no se consideran parte del sistema sismorresistente y su diseño se rige principalmente por cargas gravitacionales; sin embargo, en algunas ocasiones se ven como cargas puntuales en el sistema de diafragma rígido.

2.1.1 Tipos de soportes de techo

Existe variedad en el tipo de sección utilizada con fin de soporte de techo. En Costa Rica para estructuras de acero es común el uso de largueros a base de perfiles doblados en frío, en secciones C o Z, como se observa en la figura 5. También, es común en Costa Rica para naves industriales de concreto el uso de perfiles T en sección variable. Entre otros menos utilizado tales como elementos tipo cercha o de acero armados de alma abierta.

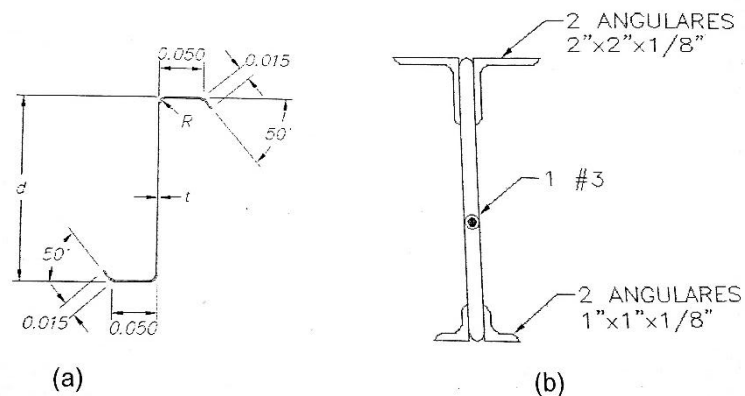


Fig. 5 Larguero de acero para techos. (a) larguero compuesto por un perfil de sección Z. (b) Larguero de alma abierta, compuesto por angulares y varillas.

Fuente: (Ugalde, 2008)

Los elementos de acero armados de alma abierta, según afirma (Ugalde, 2008):

Se componen de dos angulares en ala de en tensión también, ambas alas unidas entre sí por varillas inclinadas. Este diseño tiene la ventaja de que al ser un larguero ensamblado puede alcanzar longitudes mayores que los perfiles Z individuales, cuyo largo está restringido por

la disponibilidad en el mercado. Tienen la desventaja de requerir mayor mano de obra y de ocupar más espacio, pues su peralte tiende a ser mayor que el de los perfiles doblados en frío típicos. (pág. 21)

Como se muestra en la figura 6, en el caso de largueros de alma llena los tensores son varillas lisas roscadas que atraviesan el alma de los largueros y se sujetan por medio de tuercas. En este caso el último larguero del techo debe soportar además compresiones en el alma generadas para equilibrar fuerzas que vienen de los tensores, por lo tanto, se tiene que reforzar adecuadamente.

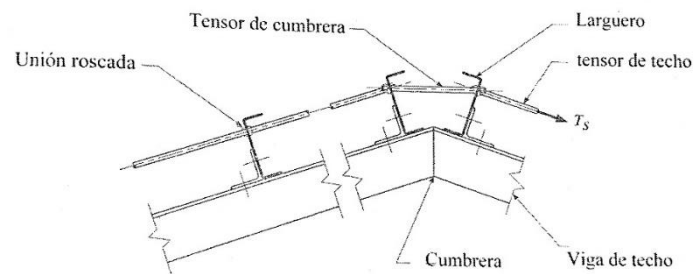
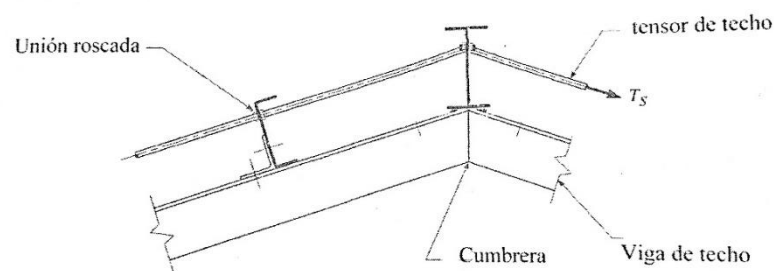


Fig. 6 Detalle larguero de alma llena.

Fuente: (Ugalde, 2008)

Por otra parte, los largueros de alma abierta, tal como se presentan en la figura 7, tienen mayor peralte por lo que requieren riostras laterales que le den estabilidad y tensores que reduzcan el momento el eje débil.



Fuente: (Ugalde, 2008)

Fig. 7 Detalle de larguero de alma abierta.

La utilización de este tipo de elementos unidos como se describe anteriormente es amplia en otros países como Estados Unidos; existe el Instituto de Viguetas de Acero, S.J.I. por sus siglas en inglés (*Steel Joist Institute*) que estudia el uso de elementos como vigas y viguetas para techo y entrepisos. También, se cuenta con tablas de diseño que permiten seleccionar la luz y

las cargas y con esto la sección apta para la edificación; estas tablas no son válidas para uso en Costa Rica, pues no se cuenta con la homologación correspondiente de los materiales.

2.1.2 Materiales utilizados en la construcción de soportes de techo

1.1.1.1 Acero

El acero se fabricó por primera vez hace 2000 o 3000 años; sin embargo, no fue sino hasta mediados del siglo XIX cuando en Inglaterra y Estados Unidos se desarrolló un método económico para producirlo en cantidades industriales. El proceso se llama Bessemer, en honor al primer inglés en utilizarlo. Su producción de esta manera permitió ofrecerlo a costos competitivos, ganando terreno al hierro dulce y al hierro fundido, y para 1890 el acero era el metal de principal uso estructural en Estados Unidos, (McCormac J. , 1996).

En las décadas siguientes el auge del acero continuó, con el desarrollo de procesos de fabricación modernos como los altos hornos o los hornos de arco eléctrico, así como diferentes procesos de laminación, (Vinnakota, 2006)

(Ugalde, 2008) afirma:

El acero es una aleación metálica, fabricada a base de hierro principalmente y pequeñas porciones de otros elementos como carbono, manganeso, fósforo y azufre. Estos últimos componentes, pese a su pequeña proporción al combinarse con el hierro, dan al compuesto resultante características por encima de cualquier otro material metálico como el hierro negro o el aluminio, (pág. 7).

El acero en comparación con el concreto reforzado o la madera tiene una condición isótropa y su situación no varía de un lugar a otro, esto es, que sus propiedades se mantienen.

Ventajas del acero como material estructural

- *Alta resistencia*

“La alta resistencia del acero por unidad de peso implica que será relativamente bajo el peso de las estructuras.” (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 1)(McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 1)

- *Uniformidad*

“Las propiedades del acero no cambian apreciablemente con el tiempo, como es el caso de las estructuras de concreto reforzado”, (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 1).

- *Elasticidad*

(McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017) afirma:

El acero se acerca más en su comportamiento a la hipótesis de diseño que la mayoría de los materiales, debido a que sigue la ley de Hooke hasta esfuerzos bastante altos. Los momentos de inercia de una estructura de acero se pueden calcular exactamente, en tanto que los valores obtenidos para una estructura de concreto reforzado son relativamente imprecisos. (pág. 1).

- *Durabilidad*

“Si el mantenimiento de las estructuras de acero es adecuado durarán indefinidamente. Investigaciones realizadas en los aceros modernos, indican que bajo ciertas condiciones no se requiere ningún mantenimiento a base de pintura”, (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 2).

- *Ductilidad*

(McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017) afirma:

La ductilidad es la propiedad que tiene un material para soportar grandes deformaciones sin fallar bajo esfuerzos de tensión altos. Un material que no tenga esta propiedad por lo general es inaceptable y probablemente será duro y frágil y se romperá al someterlo a un golpe repentino.

La naturaleza dúctil de los aceros estructurales comunes les permite fluir localmente en esos puntos, evitándose así fallas prematuras. Una ventaja adicional de las estructuras dúctiles es que, al sobrecargarlas, sus grandes deflexiones ofrecen evidencia visible de la inminencia de la falla, (pág. 2).

- *Tenacidad*

“Poseen resistencia y ductilidad. Un miembro de acero cargado hasta que se presentan grandes deformaciones será aun capaz de resistir grandes fuerzas.” Esta característica implica que los aceros pueden someterse a grandes deformaciones durante su fabricación y montaje, sin fracturarse. (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 2)

- *Ampliación de estructuras existentes*

“Las estructuras de acero se adaptan muy bien a posibles ampliaciones”. Ya que se pueden añadir incluso alas enteras a estructuras de acero ya existentes proporcionando versatilidad. (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 3)

- *Propiedades diversas*

Se pueden unir diversos miembros mediante varios tipos de conexión simple, con soldadura o pernos, y se da la posibilidad de prefabricar miembros, rapidez de montaje, de laminarse en variedad de tamaños, y de reutilizarse y posteriormente venderlo como chatarra. (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 3)

Desventajas del acero como material estructural

- *Corrosión*

“La mayor parte de los aceros son susceptibles a la corrosión al estar expuestos al aire y al agua y, por consiguiente, deben pintarse periódicamente”, (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 3)

- *Costo de la protección contra el fuego*

(McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017) afirma:

El acero es un excelente conductor del calor, de manera que los miembros de acero sin protección pueden transmitir suficiente calor de una sección o compartimento incendiado de un edificio a secciones adyacentes del mismo edificio e incendiar el material presente. En consecuencia, la estructura de acero de un edificio debe protegerse mediante materiales con ciertas características aislantes”, (pág. 3)

- *Susceptibilidad al pandeo*

“Cuanto más largos y esbeltos sean los miembros a compresión, tanto mayor es el peligro de pandeo”. En ocasiones se deben utilizar elementos que reduzcan este fenómeno y por tanto afecta la economía. (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 4)

- *Fatiga*

“Su resistencia se puede reducir si se somete a un gran número de inversiones del sentido del esfuerzo, o bien, a un gran número de cambios en la magnitud del esfuerzo de tensión”, (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 4)

- *Fractura frágil*

(McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017) afirma:

Bajo ciertas condiciones de acero puede perder su ductilidad y la fractura frágil puede ocurrir en lugares de concentración de esfuerzos. Las cargas que producen fatiga y muy bajas temperaturas agravan la situación. Las condiciones de esfuerzo triaxial también pueden conducir a la fractura frágil, (pág. 4).

Acero laminado en caliente

Según Ugalde, 2008, el acero laminado en caliente se puede realizar de dos maneras, mediante laminado en molinos o con vaciado continuo.

En el proceso con molinos, se introducen lingotes de acero que luego se comprimen y después se moldea a productos semiterminados (barras, planchas). Luego se recaliente para darle el acabado deseado.

Por otro lado, el proceso mediante vaciado continuo es más eficiente, el acero es vertido en caliente sobre moldes enfriados con agua. Luego, una vez solidificado se retira el molde y el acero aún caliente empieza a laminarse por rodillos directamente en el producto final. Con este proceso se da menos desperdicio de material y las impurezas se distribuyen de manera uniforme, (Ugalde, 2008, pág. 15).

Para el diseño de estos elementos se utilizan tanto el manual como la especificación del Instituto Americano de Construcción en Acero. (*American Institute of Steel Construction, 2004*) (*American Institute os Steel Construction, 2005*)

Acero doblado en frío

Según Mc Cormac, 2017, este tipo de perfil se fabrica doblando láminas delgadas de acero de bajo carbono o baja aleación en prácticamente cualquier sección transversal deseada, como se muestra en la figura 8 que sigue. Los espesores varían, dependiendo del uso que se les dé. Al trabajarlo en frío se reduce la ductilidad y aumenta la resistencia. (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017, pág. 16). Para el diseño del acero doblado en frío, se utiliza el Manual del Instituto Americano del Hierro y Acero. (*American Iron and Steel Institute, 2002*).

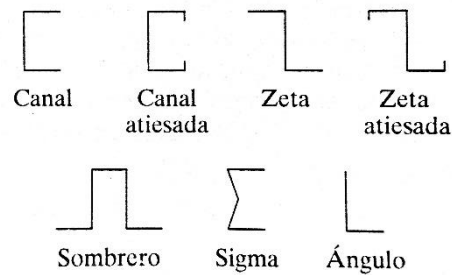


Fig. 8 Perfiles doblados en frío.

Fuente: (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017)

1.1.1.2 Concreto y concreto reforzado

(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011), afirma:

El concreto es una mezcla de arena, grava, roca triturada y otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua. En ocasiones, uno o más aditivos se agregan para cambiar ciertas características del concreto, tales como la ductilidad, durabilidad y tiempo de fraguado, (pág. 1).

El concreto tiene una alta resistencia a la compresión y muy baja resistencia a la tensión, como es particular de los materiales pétreos.

Por otro lado, el concreto reforzado es la combinación entre concreto y acero, donde el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión de la cual el concreto carece.

1.1.1.3 Concreto reforzado y concreto preesforzado

En el mercado nacional para los sistemas prefabricados de naves industriales se hace uso extensivo de la tecnología del preesforzado para la solución de problemas de ingeniería. Este tipo de concreto se utiliza en elementos como vigas de techo y entrepiso, largueros de techo, paneles de cerramiento y entrepiso con el fin de controlar las deflexiones y el agrietamiento, reducir las secciones y el peso e incrementar la rigidez, (Arce, Murillo, & Lagos, 2018).

Una de las principales filosofías para el diseño en concreto preesforzado es garantizar que las secciones no presenten agrietamiento por flexión para las cargas de servicio, y por este motivo tiene importantes implicaciones a escala económica.

(Arce, Murillo, & Lagos, 2018), afirma:

Una primera consideración es que en el análisis estructural para cargas gravitacionales será apropiado usar en vigas el momento de inercia de la sección sin agrietas. Para el análisis sísmico por los métodos estático o dinámico puede usarse un momento de inercia de alrededor de $0,80 I_g$, con el objeto de tomar en cuenta que existe agrietamiento localizado en las zonas de rótulas plásticas. (págs. 12-2). La figura 9 muestra el diseño sin agrietar de elementos preesforzados.

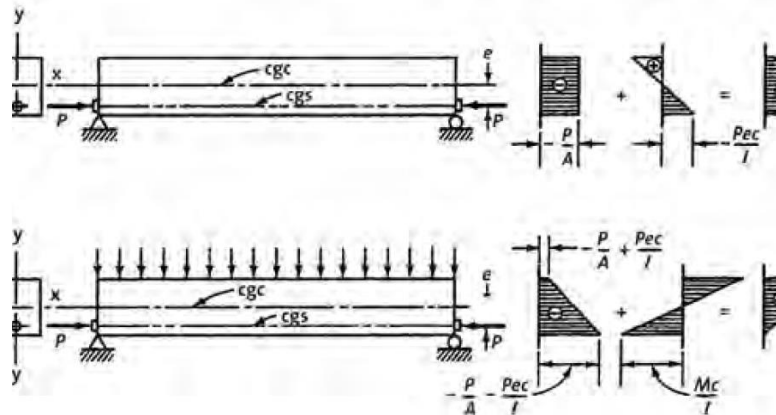


Fig. 9 Diseño sin agrietar de elementos preesforzados para cargas de servicio1.

Fuente: (Arce, Murillo, & Lagos, 2018)

Para el caso del concreto preesforzado el concreto usualmente tiene una resistencia a los 28 días superior al concreto normal y que va entre 420 a 700 kg/cm^2 . Este tipo de metodología preesforzada en naves industriales permite la solución económica para espacios con luces grandes o voladizos extensos, que de otra manera presentarían deflexiones. (Arce, Murillo, & Lagos, 2018, págs. 12-2).

Ventajas del concreto reforzado como material estructural

- Tiene resistencia considerable a la compresión por unidad de costos si se compara con otros materiales.
- Resistencia a las acciones del fuego y el agua.
- Este tipo de estructuras es muy rígido.
- Requiere poco mantenimiento.
- Tiene larga vida de servicio, si se compara con otros materiales.
- Es el único material económicamente disponible en algunas aplicaciones, tales como: losas de piso, muros de sótano, pilares o similares.

- Se puede colar en variedad de formas, desde vigas y columnas hasta arcos y cascarones.
- En muchas regiones, se pueden utilizar los mismos recursos de la zona (arena, grava y agua), minorando los costos de fabricación.
- En comparación con el acero estructural, el concreto reforzado requiere mano de obra de baja calificación.
- (McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011, pág. 1)

Desventajas del concreto reforzado como material estructural

- Debido a que el concreto tiene resistencia baja a la tensión, se requiere refuerzo a tensión.
 - Se requiere encofrar el concreto en una determinada posición hasta que este endurezca lo suficiente. Incluso en algunos casos puede requerir de apuntalamiento.
 - “La baja resistencia por unidad de peso de concreto conduce a miembros pesados”. Para minorar esta desventaja se pueden utilizar agregados ligeros, pero aumenta los costos de fabricación.
 - “La baja resistencia por unidad de volumen del concreto implica que los miembros serán relativamente grandes”. Esta desventaja debe considerarse con mayor importancia en edificios altos o estructuras con grandes claros.
 - Debido a las variaciones en su proporción y mezclado, las propiedades del concreto pueden cambiar. Otro aspecto que puede variar las propiedades es su colado y curado.
 - Puede causar contracción y fluencia plástica del concreto.
- (McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011, pág. 2)

¿Da mejor resultado constructivo el concreto reforzado o el acero estructural?

(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011), afirma:

No hay una respuesta simple a esta pregunta, sobre todo porque ambos materiales tienen muchas características excelentes que pueden utilizarse con tan buenos resultados en muchos tipos de estructuras. De hecho, con frecuencia ambos se emplean en las mismas estructuras con estupendos efectos, (pág. 6).

La toma de decisión de qué material utilizar para una edificación, ya sea acero o concreto, se rige por efectos del uso que se le va a dar, o bien, temas económicos. Si bien es cierto,

el acero favorece en asuntos de tiempo indudablemente, si se requiere calificar una estructura contra el fuego, el concreto es ideal, de otra manera se tendría que utilizar un recubrimiento en el acero y resultaría más costoso. (McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011, pág. 6).

En general, en la decisión de si se debe utilizar concreto o acero se tendrán que tomar en cuenta los factores de diseño que intervienen, tales como; luces, cargas, consideraciones arquitectónicas, entre otros. (McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011, pág. 6).

1.1.1.4 Compatibilidad del concreto y el acero

(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011), afirma:

El concreto y el acero de refuerzo funcionan en forma excelente en las estructuras de concreto reforzado. Las ventajas de cada material compensan las desventajas del otro. Por ejemplo, la gran desventaja del concreto es su falta de resistencia a la tensión; pero esta es una de las grandes ventajas del acero. Las varillas de refuerzo tienen una resistencia a la tensión aproximadamente 100 veces mayor a la del concreto usado.

Los dos materiales se adhieren muy bien entre sí, de modo que no hay deslizamiento entre los dos, y por tanto funcionan conjuntamente como una unidad para resistir las fuerzas. La excelente liga obtenida se debe a la adherencia química entre los dos materiales, a la rugosidad natural de las varillas y a la estrecha separación de corrugaciones en la superficie de las varillas.

Las varillas de refuerzo están expuestas a la corrosión, pero el concreto que las rodea les proporciona excelente protección. La fuerza del acero expuesto a las temperaturas que se alcanzan en los incendios normales es nula, pero su recubrimiento con concreto da como resultado calificaciones de prueba de fuego muy satisfactorias. Finalmente, el concreto y el acero trabajan muy bien juntos respecto a los cambios de temperatura porque sus coeficientes de dilatación son muy parecidos, (pág. 6),

2.3 Estados de esfuerzo

Durante su vida funcional las estructuras están sometidas a cargas externas debido a diferentes causas, y su comportamiento es diferente; sin embargo, su objetivo de alcanzar la simplificación teórica que permita analizar y predecir la resistencia de los materiales que soportan

dichas acciones es el mismo. La formulación teórica sobre todo con probabilidades de carga y promedios de resistencia permite evaluar de manera eficiente una estructura, (Alfaro J. P., 2015).

2.3.1 Esfuerzo por carga axial

Se dice que un elemento está sometido a carga axial cuando una de las cargas resultantes viaja a lo largo de su eje longitudinal; dicha carga puede significar compresión (cuando la dirección de las cargas converge) o tensión (cuando la dirección diverge). (Alfaro J. P., 2015). La figura 10 la determinación del esfuerzo normal máximo en una barra cargada axialmente.

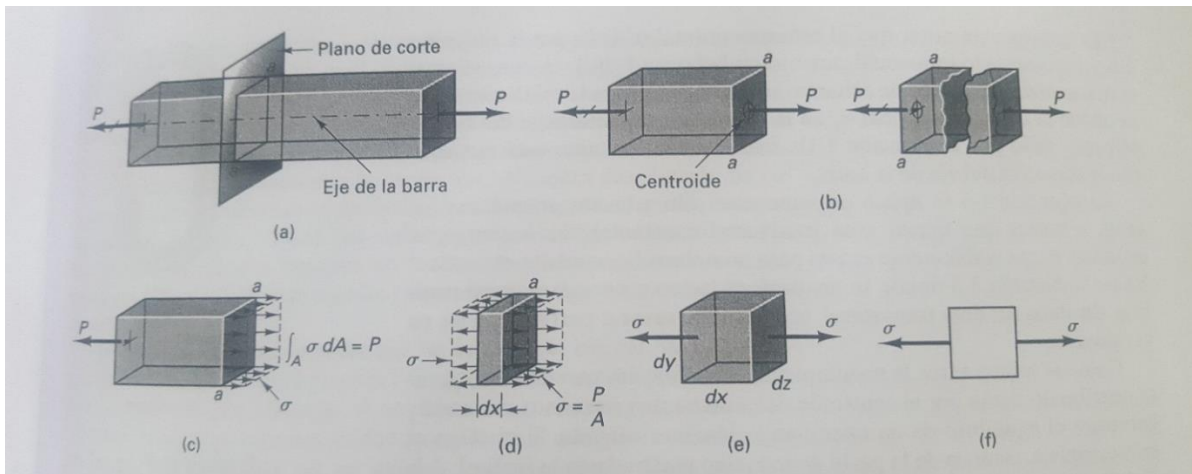


Fig. 10 Pasos sucesivos en la determinación del esfuerzo normal máximo en una barra cargada axialmente.

Fuente: (Popov, 2000)

Cuando un elemento está sometido a carga axial, sufre un esfuerzo resistente normal:

$$\sigma_{axial} = \frac{P}{A} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

σ axial = esfuerzo axial resultante.

P = carga axial resultante.

A = área transversal que soporta la carga.

Es importante recalcar que el efecto de esbeltez influye en la respuesta mecánica de los materiales, esta se refiere a la relación entre la sección transversal y la longitud de un

elemento. Ver figura 11, relacionada con el efecto de esbeltez debido a la respuesta mecánica a la compresión.

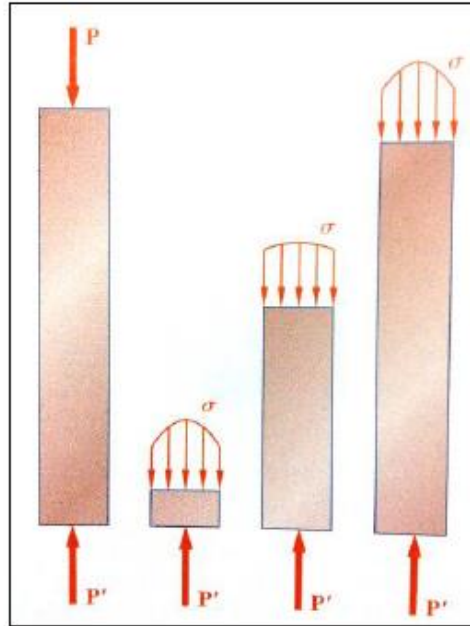


Fig. 11 Distribución de esfuerzos en la respuesta mecánica a la compresión.

Fuente: (Beer, Russell, & Dewolf, 2007)

Según afirma José Alfaro, “En los materiales isotrópicos simples (acero y plástico) y anisotrópicos simples (madera y concreto simple), la carga axial viaja aproximadamente uniforme a través del área que la resiste, con lo que la ecuación anterior se cumple a cabalidad; sin embargo, para el concreto reforzado con barras, la carga viaja a través del área transversal de concreto y de las barras...”. (Alfaro J. P., 2015).

Por lo cual las últimas tienen mayor resistencia a la fluencia, por ello el comportamiento ante las deformaciones y la rigidez se considera el diseño con mayor precisión.

2.3.2 Esfuerzo por carga cortante

Por otra parte, el esfuerzo a cortante se refiere a las cargas que atraviesan perpendicularmente el plano longitudinal de una sección, de forma tal que trata de atravesar el elemento en dicho plano.

Según afirma José Alfaro, “La respuesta mecánica de un elemento sometido a cortante puro, resulta en un plano crítico con una inclinación de 45° , lo que significa que cuando un elemento sea sometido a esfuerzos de corte, la reducción de su área transversal o fisuras se desarrollen en dicho ángulo, este efecto inicia en el centro de la sección que se encuentra libre de efectos de flexión...”. (Alfaro J. P., 2015).

Cuando se tienen combinaciones de esfuerzos, estos deben analizarse detalladamente, ya que su comportamiento sería distinto según su combinación.

2.3.3 Esfuerzos por momento flector

Estos esfuerzos son generalmente una consecuencia de la transmisión de fuerzas cortantes mediante un elemento, como se muestra en la figura 12. “La flexión es una respuesta o acción que busca resistencia en el material deformándolo mediante curvatura...”. Si se requiere ver desde un punto geométricamente, para un punto de flexión pura se obtiene un centro radical equidistante de cualquier punto del elemento deformado. (Alfaro J. P., 2015).

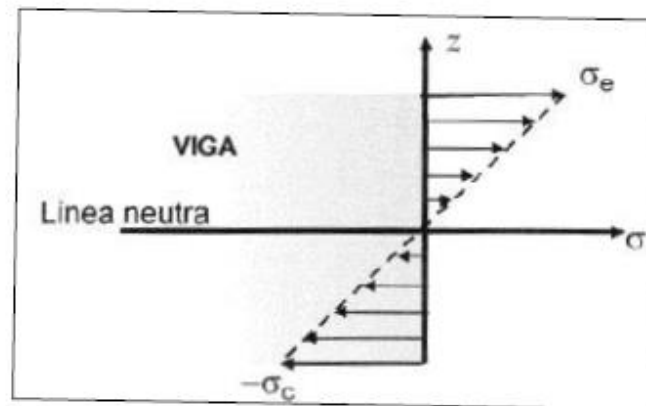


Fig. 12. Distribución general de esfuerzo por momento flector.

Fuente: (Alfaro J. P., 2015)

2.3.4 Esfuerzos combinados de cortante y momento flector

“Las acciones combinadas de cortante y momento pueden coincidir en un punto específico de un elemento, debido a la relación de ambas...”. Es por esta razón que se generan condiciones de esfuerzo particulares sobre las zonas sometidas a tales efectos, obteniendo condiciones variables entre efectos de flexión pura y cortante puro, de esta manera se evidencian patrones de agrietamiento dependiendo de su relevancia. (Alfaro J. P., 2015). En la figura 13 se muestra un ejemplo referente a los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante.

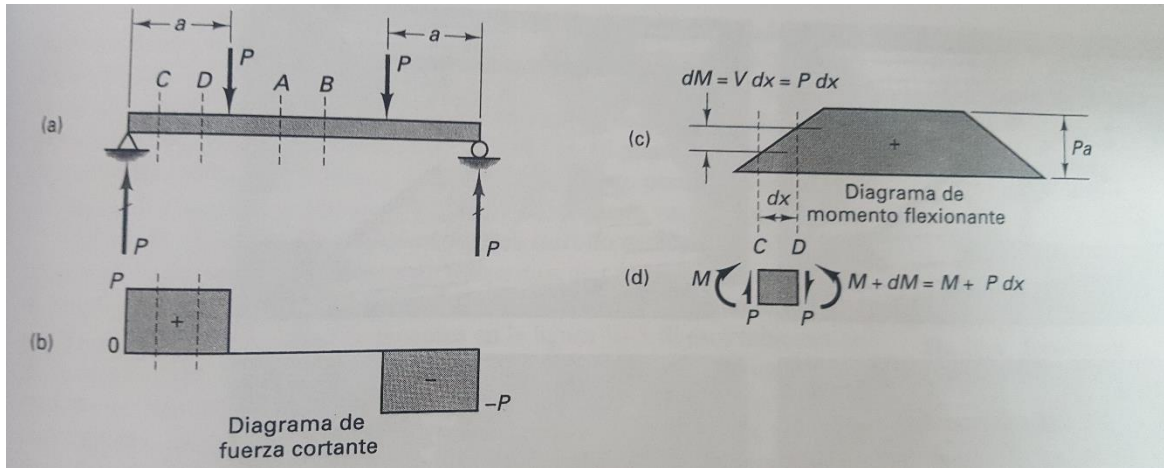


Fig. 13. Ejemplo de diagramas de fuerza cortante y momento flexionante para la carga mostrada.
Fuente: (Popov, 2000)

2.4 Metodologías de diseño

2.4.1 Diseño por esfuerzos permisibles (A.S.D. por sus siglas en inglés)

Esta metodología de diseño promueve la seguridad de las estructuras utilizando tres premisas fundamentales:

- El material no se deforma permanentemente.
- Los esfuerzos en los elementos nunca alcanzan el límite de fluencia.
- El material sirve a los requerimientos de la estructura siempre en su rango elástica.

Esta metodología es ampliamente utilizada por su simplicidad, aunque ha caído en análisis ineficientes e ineficiencia por su rigidez en la resistencia probable de los materiales.

En dicho método, los factores de seguridad son subjetivos y se aplican a las resistencias y no a las cargas del modelo; por lo anterior, se genera un modelo determinístico que dista mucho del comportamiento estocástico en la interacción entre estructuras y cargas.

2.4.2 Método de factores de carga y resistencia (L.R.F.D. por sus siglas en inglés)

Por otra parte, este método fue desarrollado por el Instituto Americano de la Construcción del Acero (A.I.S.C. por sus siglas en inglés), y se basa en el cálculo de estructuras por límites de resistencia y de servicio. Es un modelo probabilístico, que analiza los estados límites posibles, resistencia requerida por la estructura y confiabilidad de los materiales utilizados.

En este método se utilizan factores de reducción y amplificación, se calibran mediante análisis experimentales históricos que introducen al diseño mecánico y estructural, además de condiciones estadísticas para optimizar la eficacia de la solución.

Dicho método es apropiado, ya que toma en cuenta la variabilidad de las cargas y de las resistencias, condensándolas en un resultado estadísticamente seguro y discreto para diferentes estados límites de diseño.

CAPÍTULO II. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Paradigma, enfoque metodológico y método (s) de investigación propuestos

Las características de los materiales para la construcción de largueros de techo ya sea acero o concreto, se han distinguido por sus ventajas y desventajas, asimismo el acero es utilizado por ser liviano y poder colocarse en continuidad; por otro lado, el concreto, marca la diferencia por su estabilidad, durabilidad, además de su poco o nulo mantenimiento; esto sin dudar ha marcado un paradigma en la construcción de largueros en Costa Rica.

En el presente documento se realizará la investigación mediante el enfoque cuantitativo, en el cual se utilizan las diferentes propuestas de diseño para analizar con certeza la hipótesis formulada en el capítulo introductorio, y de esta manera es posible aportar la evidencia necesaria respecto a los lineamientos del análisis.

Además, se trata de un método investigativo de tipo experimental para analizar si las variables independientes afectan o no las variables dependientes mediante la concepción experimental que requiere la manipulación intencional de una acción para analizar los posibles resultados; asimismo, se manipulan diferentes variables las cuales son nombradas como “propuestas”, para analizar las consecuencias que dicha manipulación tiene sobre una o más variables, que en este caso están dadas por distanciamientos, cargas recibidas o materiales implementados.

En este capítulo se presentan las diversas consideraciones tomadas para el diseño de los elementos, tales como materiales, cargas aplicadas, geometría y códigos utilizados. Asimismo, se muestra de manera generalizada todo el procedimiento con el que se diseñó cada tipo de larguero.

3.2 Categorías de análisis de la investigación (operación de variables)

Los elementos de soporte de techo son analizados en forma manual y teórica, además de ser comprobados mediante un *software* de análisis estructural para así verificar el esfuerzo de demanda de este. Todo el proceso fue para hallar el análisis y diseño adecuado que permita ampliar las longitudes de los largueros en más de doce metros. Se desea encontrar las variables dependientes, en cuanto a cargas axiales percibidas por el elemento estructural y los

costos asociados a las propuestas; esto, tomando en cuenta diferentes longitudes posibles para soporte de techo y evaluando diferentes cargas aplicadas por medio de fórmulas y análisis estructural, de esta manera se puede encontrar un elemento óptimo y dar solución al problema de esta investigación.

3.2.1 Procedimiento para propuesta de diseño estructural

Se realiza un procedimiento de análisis para elementos simplemente apoyados, se establecen las opciones para el sistema de soporte de techo utilizando “casos” como posibles variables geométricas.

Para cada “caso” se evalúa en longitudes de doce, catorce y dieciséis metros, que a su vez se valoran con tres combinaciones de carga distintas, tal cual se muestra en el diagrama de flujo en la figura 14, 15, 16 y 17 que siguen. Todo con el fin de determinar el soporte de techo adecuado y óptimo, que además permita ampliar las luces de colocación actuales en más de doce metros.

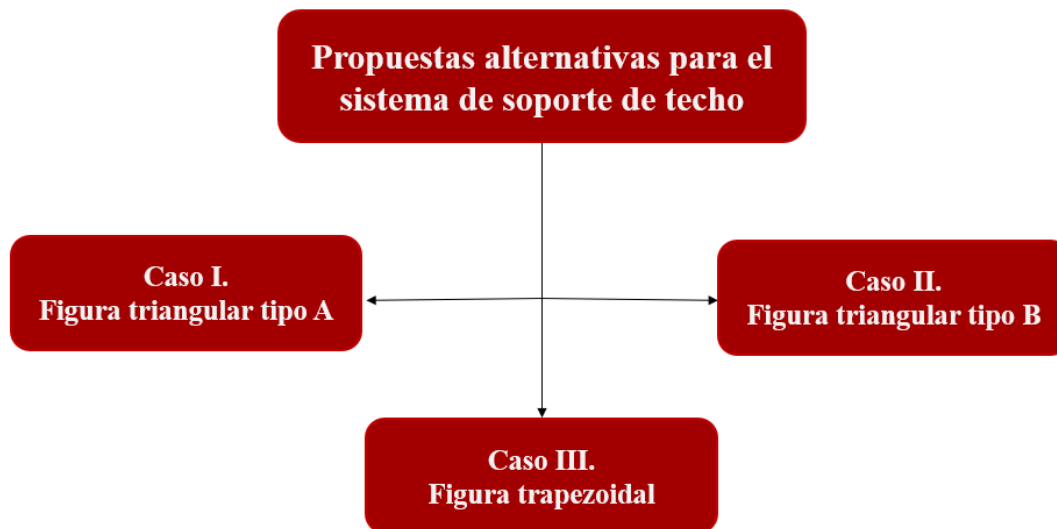


Fig. 14. Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas para el sistema de soporte de techo.

Fuente: Propia.



Fig. 15 Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas del caso 1.

Fuente: Propia



Fig. 16 Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas del caso 2.

Fuente: Propia.



Fig. 17 Diagrama de flujo para la obtención de las propuestas alternativas del caso 3.

Fuente: Propia.

3.2.1.1 Estudio de los casos

- **Caso 1:**

Debido a las ventajas y desventajas de los materiales expuestas en el capítulo I del presente documento, por las virtudes del acero se establece una geometría longitudinal para el soporte de techo que consta de dos tubos estructurales de acero cuadrados corridos en la parte inferior y un tubo estructural de acero cuadrado corrido en la parte superior (que será utilizado posteriormente como anclaje para la lámina de techo), los tubos principales unidos entre sí con piezas de tubo estructural de acero cuadrado a cada metro de distancia entre ellos, como se ilustra en la figura 18 y 19, la longitud del soporte de techo varía desde los 12 metros hasta los 16 metros. Se realiza el análisis utilizando el método de estructura simplemente apoyada con carga distribuida de acuerdo con las combinaciones de carga propuestas en el diagrama de las figuras 14, 15, 16 y 17.

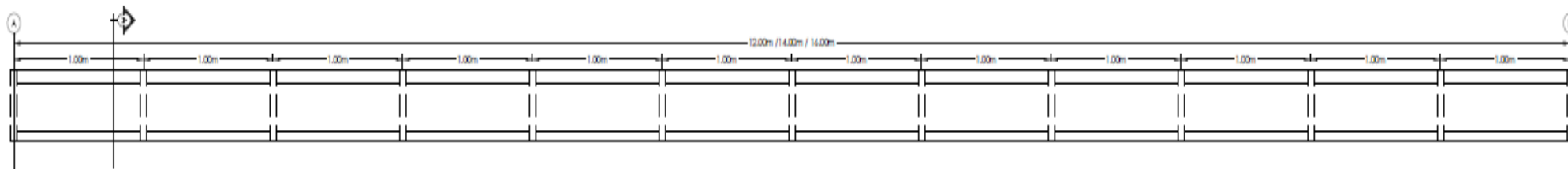


Fig. 18 Soporte de techo para la propuesta del caso 1, longitud variable.

Fuente: Propia.

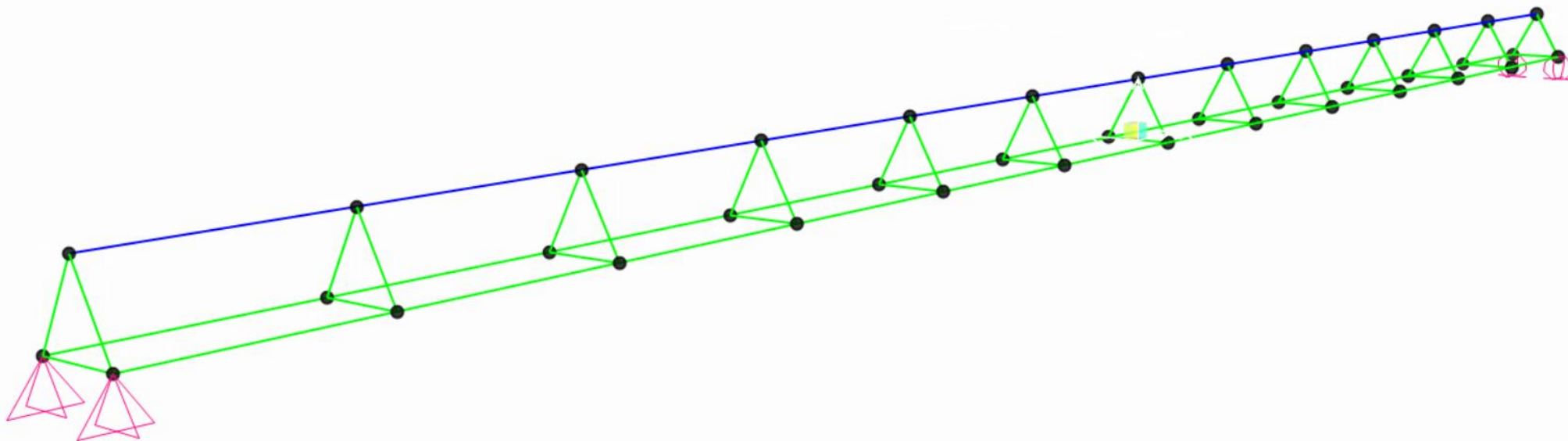


Fig. 19 Perspectiva de soporte de techo para el caso 1, longitud variable con condiciones de apoyo.

Fuente: Propia.

- **Caso 2:**

Se establece una geometría longitudinal, similar a la del caso 1; sin embargo, su diferencia radica en los tubos estructurales de acero cuadrado unidos entre sí, como se observa en las imágenes que siguen, convergen diagonalmente unos con otros cada cincuenta centímetros en el tubo superior.

Al igual que el caso 1, consta de dos tubos estructurales de acero cuadrados corridos en la parte inferior y uno estructural de acero cuadrado corrido en la parte superior (que será utilizado posteriormente como anclaje para la lámina de techo), los tubos en posición diagonal que amarran los inferiores y superior son piezas de tubo estructural de acero cuadrado a cada metro de distancia entre ellos, de acuerdo con las combinaciones de carga como se ilustra en la figura 20 y 21, la longitud del soporte de techo varía desde los 12 metros hasta los 16 metros. Se realiza el análisis utilizando estructura simplemente apoyada con carga distribuida.

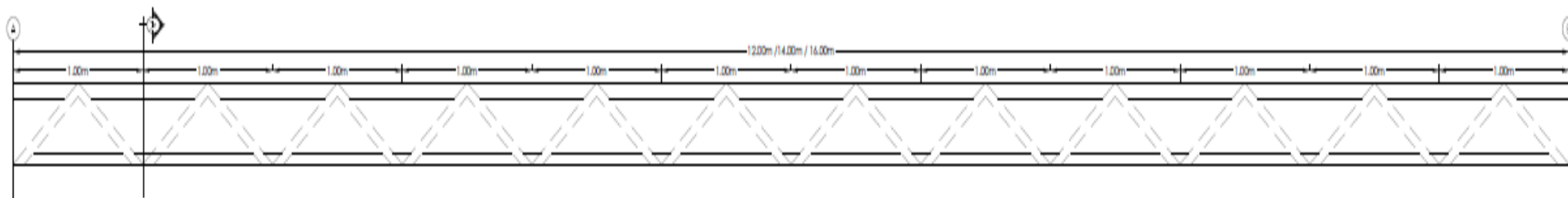


Fig. 20. Soporte de techo para la propuesta del caso 2, longitud variable.

Fuente: Propia.

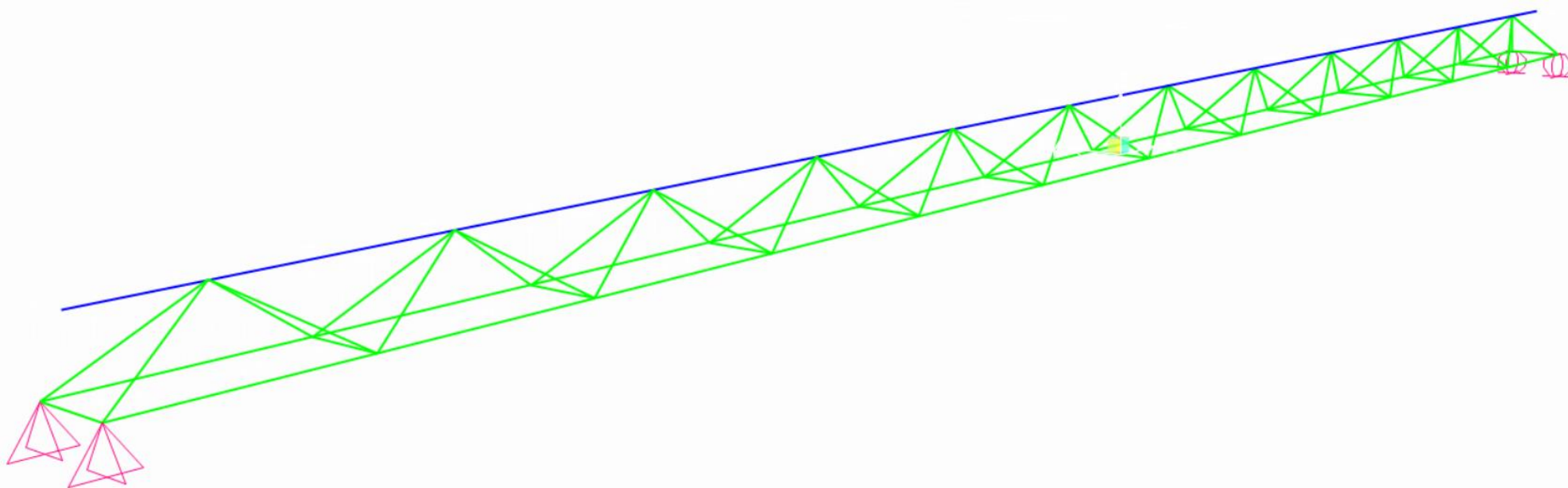


Fig. 21. Perspectiva de soporte de techo para el caso 2, longitud variable con condiciones de apoyo.

Fuente: Propia.

- **Caso 3:**

Debido a las excelentes propiedades que se conforman al combinar acero y concreto, y a que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a tensión de la cual el concreto carece, se establece una geometría longitudinal para el soporte de techo; consta de dos tubos estructurales de acero cuadrados corridos en la parte inferior y una placa de concreto de treinta centímetros de ancho por seis centímetros de espesor, reforzada con una malla de acero fabricada en sitio con acero (varilla deformada) a cada quince centímetros en ambas direcciones, con las combinaciones de carga según se ilustra en la figura 14. Además, la placa de concreto superior y los tubos inferiores se amarrarán con tubo estructural de acero cuadrado a cada metro de distancia entre ellos, según se muestra en la figura 23 y 24 el modelo propuesto para el caso 3.

La sección longitudinal de soporte de techo tendrá un diseño de sección variable en su longitud e irá desde veinticinco centímetros a los extremos hasta cuarenta centímetros en el centro, con el fin de que dicha geometría contrarreste el momento generado por la placa. Además, se analizará en dimensiones de 12 metros hasta los 16 metros. Se realiza el análisis utilizando estructura simplemente apoyada con carga distribuida.

Actualmente la empresa Productos de Concreto utiliza para el sistema de soporte de techo de naves industriales de concreto prefabricado una geometría a base de concreto pretensado de sección variable “T” para distancias entre marcos de 12 metros como máximo, como se muestra en la figura 22 que siguen.

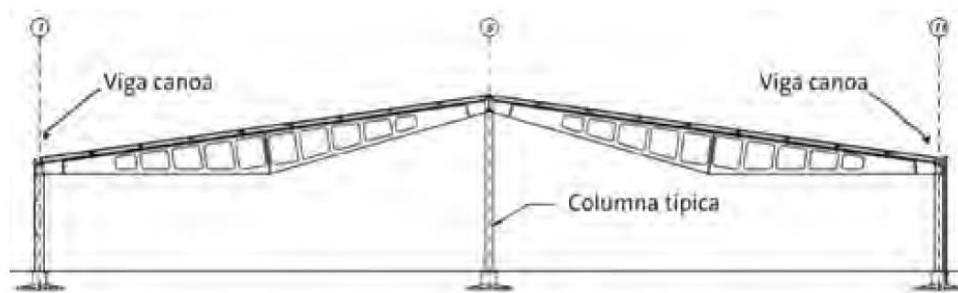


Fig. 22. Marco típico con vigas de alma abierta y pendiente del 14% en techos.

Fuente: (Arce, Murillo, & Lagos, 2018).

La geometría del caso 3 se asemeja en la sección variable del soporte; sin embargo, se hace la modificación en los componentes que la conforman, utilizando una estructura compuesta de acero estructural y concreto reforzado.

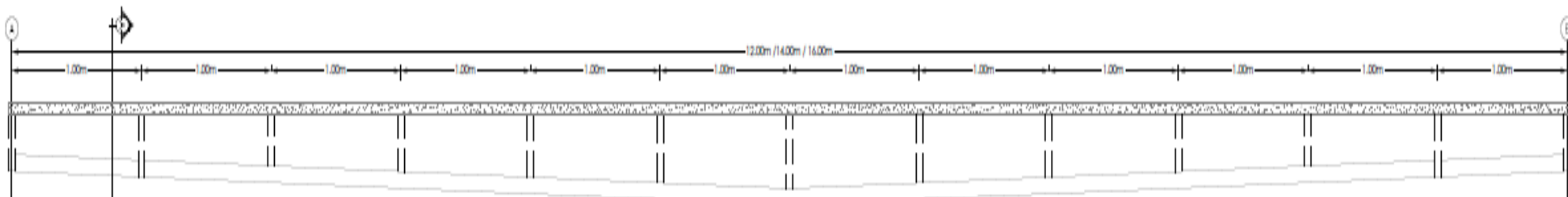


Fig. 23 Soporte de techo para la propuesta del caso 3, longitud variable.

Fuente: Propia.

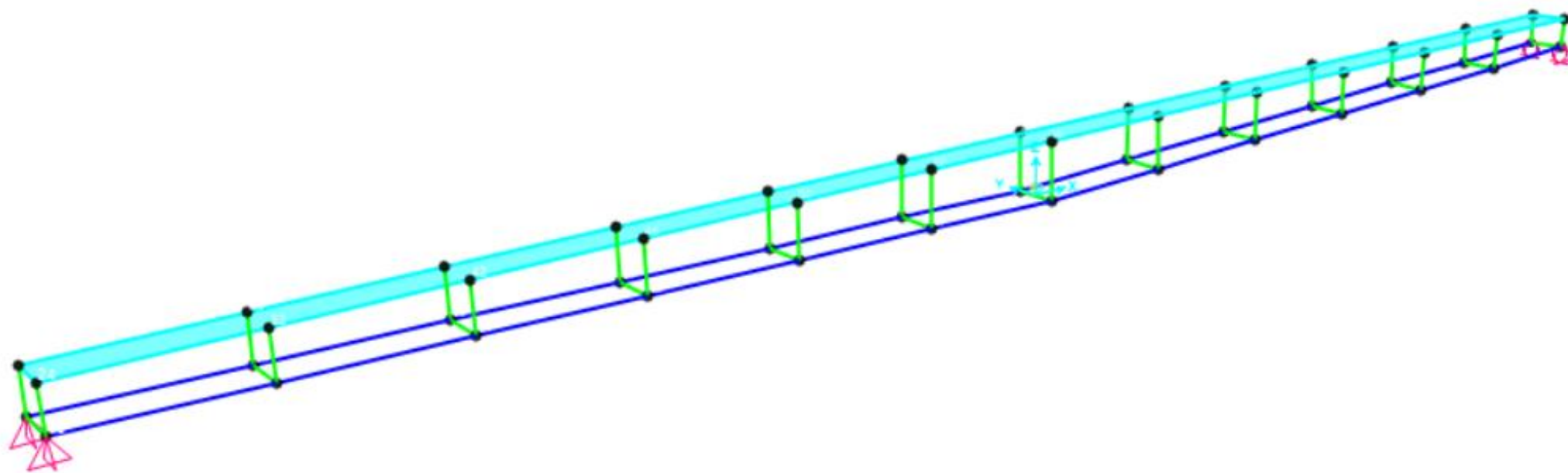


Fig. 24 Perspectiva de soporte de techo para el caso 3, longitud variable con condiciones de apoyo.

Fuente: Propia.

3.2.1.2 Pasos para el análisis estructural de los casos

Paso 1:

Se establece una geometría de trabajo y el pre - dimensionamiento de los tubos utilizados, para ser evaluados estructuralmente en pasos siguientes.

- Casos 1 y 2: Se utiliza un pre - dimensionamiento de tubos donde el tubo de acero estructural superior está definido por A_{S1} (área real del acero) y los tubos de acero estructural inferiores por A_{S2} (área real del acero) y A_{S3} (área real del acero), como se muestra en la imagen que sigue. En la figura 25 aparece la geometría de trabajo utilizada para los casos 1 y 2.

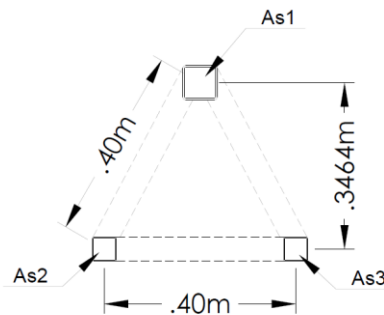


Fig. 25 Geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 1 y 2

Fuente: Propia

Donde rige la equivalencia de la ecuación 2 que sigue.

$$A_{S1} \geq A_{S2} + A_{S3} \quad (\text{Ec. 2})$$

La suposición anterior se debe a que el tubo de acero estructural superior tendrá que soportar las cargas directas para ser distribuidas hacia los tubos de acero estructural inferiores, además el tubo superior deberá servir de anclaje para las láminas de cubierta.

- Caso 3: Consta de una placa de concreto reforzado en la zona superior de 30 cm de ancho x 6 cm de espesor, reforzada con una malla fabricada en varilla # 3 a cada 15 cm en ambas direcciones. En la zona inferior del elemento se utiliza un pre - dimensionamiento de tubos de acero estructural corrido, y se emplea el dimensionamiento obtenido en los casos 1 y 2 como “ A_{S2} ” y “ A_{S3} ”; como amarre, entre la placa de concreto superior y los tubos de acero estructural corrido en la zona inferior, se utiliza también tubo de acero estructural con el

dimensionamiento obtenido en los casos 1 y 2 como “As₂” y “As₃”. En la figura 26 se muestra la geometría de trabajo utilizada para el caso 3.

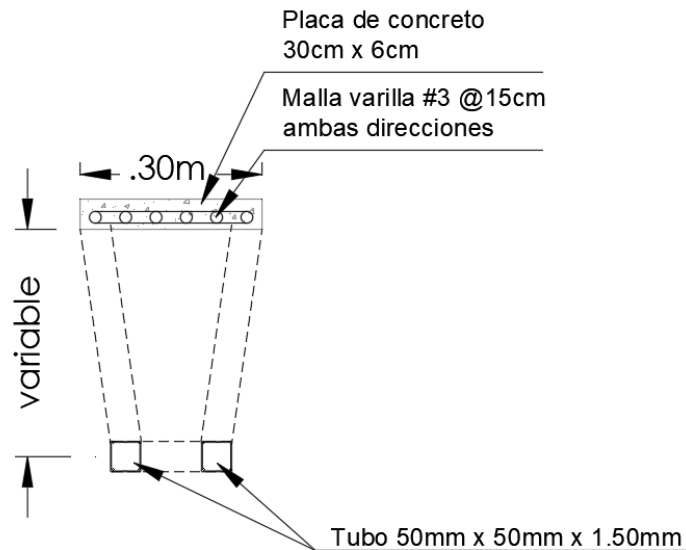


Fig. 26 Geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 3

Fuente: Propia

Paso 2:

Diseño en tensión y compresión, que consiste en la revisión en tensión y compresión crítica ejercida por la aplicación de cargas últimas en el sistema de soporte techos, tanto en el tubo superior como los inferiores.

Se hace la revisión con el uso del *software* de análisis estructural SAP 2000 de acuerdo con las combinaciones de carga últimas del Código Sísmico de Costa Rica, capítulo 6. De esta manera se verifica las condiciones críticas en carga axial dadas en unidades KN para cada una de las combinaciones de carga establecidas.

Paso 3:

Diseño geométrico respecto a las cargas críticas, tanto compresión como tensión del sistema de soporte de techo, con las especificaciones de tubos laminados en frío y en caliente.

- *Condición en compresión*

Si la carga axial crítica en compresión (tubo superior), obtenida del producto de análisis de diseño mediante las combinaciones de carga última del Código Sísmico de Costa Rica, es menor a la resistencia nominal y a la compresión del tubo propuesto (de acuerdo con la fórmula Euler); entonces, se conserva el tubo propuesto en el pre - dimensionamiento.

Si la carga axial crítica en compresión (tubo superior), obtenida del producto de análisis de diseño mediante las combinaciones de carga última del Código Sísmico de Costa Rica, es mayor a la resistencia nominal y a la compresión del tubo propuesto (de acuerdo con la fórmula Euler); entonces, se cambia el tubo propuesto en el predimensionamiento por otro que iguale o supere la resistencia nominal a la compresión.

$$P_{critico} \text{ (en compresión)} \leq \phi CPn; \text{ cumple} \quad (Ec. 3)$$

Donde,

$$\phi CPn = \phi_c F_{Cr} A_g \quad (Ec. 4)$$

ϕCPn = Resistencia nominal a la compresión

ϕ_c = Factor de reducción 0,60

F_{cr} = esfuerzo crítico

A_g = área de la sección

- *Condición en tensión*

Si la carga axial crítica en tensión (tubo inferior), obtenida del producto de análisis de diseño mediante las combinaciones de carga última del Código Sísmico de Costa Rica, es menor a la resistencia nominal y a la tensión del tubo propuesto; entonces, se conserva el tubo propuesto en el pre -dimensionamiento.

Si la carga axial crítica en tensión (tubo inferior), obtenida del producto de análisis de diseño mediante las combinaciones de carga última del Código Sísmico de Costa Rica, es mayor a la resistencia nominal y a la tensión del tubo propuesto; entonces, se cambia el tubo propuesto en el pre -dimensionamiento por otro que iguale o supere la resistencia nominal a la tensión.

$$P_{critico} \text{ (en tensión)} \leq \phi TPn; \text{ cumple} \quad (Ec. 5)$$

Donde,

$$\phi TPn = \phi_c A_s F_y \quad (Ec. 6)$$

ϕTPn = Resistencia nominal a la tensión

ϕ_c = Factor de reducción 0,90

F_y = límite de fluencia

A_s = área de la sección

Paso 4:

Se establece el diseño final de acero para toda la sección longitudinal, y se procede a optimizar el sistema.

Se define el área crítica en carga axial (compresión y tensión) y se disminuye el espesor del tubo a los extremos, la cual resultará en un área menos crítica; de acuerdo con la resistencia nominal a tensión y compresión obtenidas del análisis y las especificaciones de tubos del mercado, siempre y cuando se cumpla las condiciones del paso 3.

Se obtiene de esta manera el diseño final del soporte de techo óptimo por utilizar, como se observa en la figura 27.

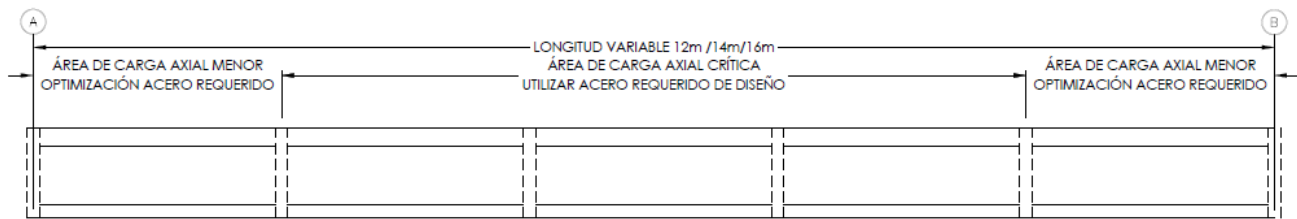


Fig. 27. Modelo de optimización para el diseño final del sistema de soporte de techo.

Fuente: Propia.

Paso 5:

Este paso únicamente aplica para el caso 3, el cual lleva una losa de concreto en su diseño. Consiste en la revisión de la losa reforzada superior mediante los siguientes pasos.

- i. Revisión de la separación mínima entre barras paralelas en una capa de refuerzo.

La mínima distancia libre entre barras paralelas de refuerzo en losas reforzadas debe ser el mayor diámetro nominal de la barra d_b , pero no menos de 25 mm. (*American Concrete Institute, 2002*)

- ii. Revisión de refuerzo por retracción y temperatura.

El refuerzo para efectos de retracción de fraguado y temperatura, para losas de cubierta, debe colocarse debajo del refuerzo negativo a flexión y perpendicular a él. En la figura 28 que sigue se puede observar la separación y dirección de refuerzo que se debe colocar. (*American Concrete Institute, 2002*).

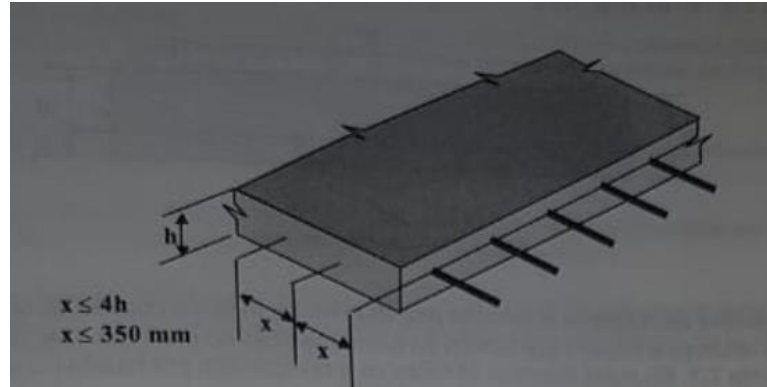


Fig. 28. Separación del refuerzo por retracción de fraguado y temperatura en losas.

Fuente: (American Concrete Institute, 2002).

Separación máxima refuerzo por retracción y temperatura.

En losas reforzadas, el refuerzo por retracción de fraguado y temperatura se debe separar a no más de cuatro veces el espesor de la losa, ni 350 mm. (American Concrete Institute, 2002)

iii. Acero mínimo requerido en el refuerzo por retracción y temperatura.

La cuantía mínima para el refuerzo por retracción de fraguado y temperatura debe calcularse con la ecuación que sigue, donde ρ_t debe ser 0,002. (American Concrete Institute, 2002)

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{b * h} \quad (Ec. 7)$$

Donde:

A_{st} : Acero requerido

h: espesor de losa

b: longitud en la dirección corta de la losa

iv. Separación máxima refuerzo a flexión.

En losas reforzadas, el refuerzo principal a flexión, ver figura 29, no se debe separar a más de tres veces el espesor de la losa ni 300mm, tal como se muestra en la figura que antecede. (American Concrete Institute, 2002)

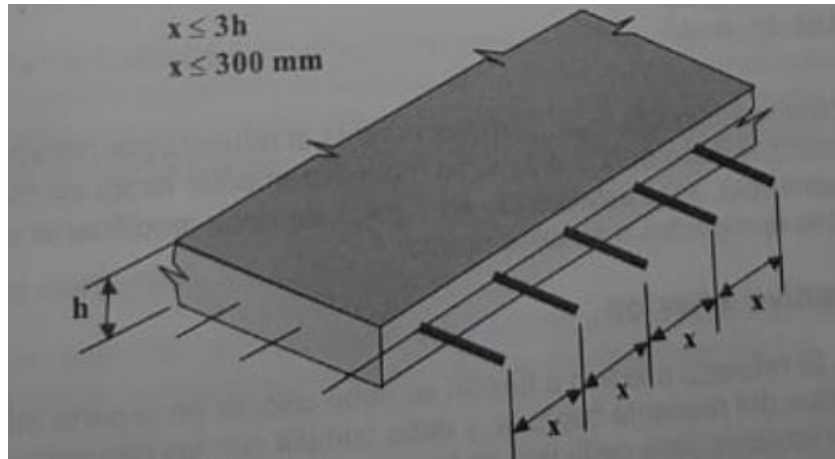


Fig. 29 Separación máxima del refuerzo en losas reforzadas.

Fuente: (American Concrete Institute, 2002).

v. Acero mínimo de refuerzo a tensión por flexión.

El área de refuerzo longitudinal a tensión por flexión en losas reforzadas debe ser mayor o igual al área requerida por retracción de fraguado y temperatura. (American Concrete Institute, 2002).

$$A_{st} > \rho_t * b * h \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

A_{st} : Acero requerido

h : espesor de losa

b : longitud en la dirección corta de la losa

Acero máximo de refuerzo a tensión por flexión.

La máxima cuantía de refuerzo permitida, $\rho = A_{st} / (b*d)$, para el refuerzo a tensión por flexión en losas reforzadas no debe exceder el valor de ρ_{max} estipulado en la tabla 3 que sigue. En losas reforzadas el refuerzo a compresión por flexión no se debe tener en cuenta en el cálculo de la resistencia de diseño a flexión. (American Concrete Institute, 2002)

Tabla 3. Cuantía máxima de refuerzo a flexión, ρ_{max} , para losas reforzadas.

Cuantía máxima de refuerzo a flexión, ρ_{max} para losas reforzadas				
		Fy (Mpa)		
		240	300	420
f'c (Mpa)	20	0,0220	0,0160	0,0100
	25	0,0270	0,0200	0,0130
	30	0,0320	0,0240	0,0150
	35	0,0360	0,0270	0,0170

Fuente: (American Concrete Institute, 2002)

vi. Resistencia aproximada de diseño a flexión.

Para losas reforzadas, la resistencia a flexión se utiliza la ecuación que sigue. (American Concrete Institute, 2002)

$$\Phi Mn = \phi * 0,85 * As * Fy * d \quad (Ec. 9)$$

Donde:

Mn: Resistencia nominal en flexión.

As: Acero requerido.

Fy: Esfuerzo de fluencia.

D: Espesor de la placa menos el recubrimiento de la placa.

Sobre el recubrimiento: Se utiliza el recubrimiento mínimo de 20 mm para refuerzo de losas reforzadas, viguetas o muros de concreto reforzado, no expuestos a la intemperie ni en contacto con la tierra, según se especifica en la sección 5.4.1 de los Requisitos Esenciales para Edificios de Concreto Reforzado. (American Concrete Institute, 2002)

vii. Obtención de la cuantía de refuerzo a flexión.

La cuantía de refuerzo requerido a flexión, $\rho = A_{st} / (b*d)$, obtenido con la ecuación que antecede. (American Concrete Institute, 2002)

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{b * h} \geq \frac{Mn}{\phi * 0,85 * As * Fy * d^2} \quad (Ec. 10)$$

Si ρ es menor que el mínimo admisible, ρ_{min} , correspondiente al refuerzo por retracción de fraguado y temperatura en losas reforzadas, se debe incrementar hasta cumplir con

él. Si ρ es mayor que máximo admisible, ρ_{max} , se debe modificar el espesor de la losa haciendo las correcciones apropiadas a su peso propio. (*American Concrete Institute, 2002*)

3.2.1.3 Análisis de costos de los casos

Para verificar la existencia en el mercado, así como corroborar los costos se utiliza como referencia para acero laminado en caliente, datos de la empresa costarricense METALCO, y para acero laminado en frío se usan datos de las empresas mexicanas Aceros Altamar y Servi Acero Comercial; son extranjeras debido a que el acero laminado en frío es difícil de conseguir en Costa Rica. (METALCO, 2019). (Serviacero Comercial, 2019) (Aceros Altamar, 2019).

Se establece un costo final total de \$4,00 por kilogramo de acero que incluye: pintura, corte, soldadura y demás costos que implica. Dicho costo está basado en experiencia de la empresa Productos de Concreto S.A. en uso de acero para soporte de techo. Luego se genera una matriz comparativa de costos por kilogramo de acero para cada propuesta.

Para el cálculo de costos de concreto reforzado, se estiman los costos detallados tomando en cuenta: encofrado, acero de amarre, acero de refuerzo, mezcla de concreto y mano de obra. Esto porque el refuerzo de acero en el concreto puede variar según el diseño en flexión, así como la volumetría del concreto por utilizar para cada caso propuesto, de esta manera los costos por metro cúbico de concreto varían considerablemente. Se genera finalmente una matriz comparativa similar a la de costos de acero.

3.3 Población y muestra

Para el análisis se hará un enfoque utilizando el país Costa Rica como indicador; sin embargo, es importante recalcar que los análisis se realizarán utilizando sus datos más críticos, por ello, se utilizará la zona de Coyol de Alajuela donde se presenta la mayor cantidad de vientos, además de estar ubicado en región sísmica III por el Código Sísmico de Costa Rica lo que garantiza la media sísmica de dicho país. Al establecer dicha población, se encuentra relacionada a una muestra infinita de casos asociados a la investigación, entonces se tomarán como muestra no probabilística tres propuestas con diferentes variables de cargas aplicadas, se varía la longitud de soporte de techo para 12 metros, 14 metros y 16 metros y habrá varianza en los materiales utilizados con diferentes combinaciones de ellos.

Se va a calcular la muestra mediante el método estadístico de eventos continuos, el cual permite realizar el análisis estadístico de simulaciones estructurales, como lo es valoración de carga axial en compresión y tensión de un elemento de soporte de techo (languero) sometido a cargas mediante la ayuda del *software* de análisis estructural SAP 2000.

Hoffmann, C., Sameh, A., & Grama, A. (2009)., advierte “la simulación computacional de estructuras es desarrollar modelos capaces de dar respuesta estructural a un alto grado de precisión. Estos modelos se utilizan para predecir, modos de falla, así como para guiar las técnicas modelos de orden reducido (los modelos con menos grados de libertad), se pueden usar para el control en tiempo real de las estructuras”, esto quiere decir que la muestra se escogerá aleatoriamente después de realizar los diseños en los programas, ya que debemos encontrar primero nuestras variables o varianzas, una vez halladas las variables se realiza una desviación estándar, para poder definir la cantidad de muestras específicas, una vez obtenido el número final de la muestra solo se realizarán las que se consideren necesarias en su momento, procurando que nuestro error no sea un porcentaje alto. Tal como se muestra en la figura 30, referente al esquema de variables.

Quevedo, L. (2012), asegura que cuando se trabaja con un sistema o un elemento real el experimento toma ventaja, ya que se puede hacer el análisis sobre los factores, por lo cual una simulación, es la técnica adecuada para el estudio de datos en elementos estructurales. Por ello Quevedo, menciona que las características del método de eventos continuos son:

- Cada situación da experiencias idénticas.
- Solo hay dos resultados posibles (bueno o malo).
- La probabilidad p de que ocurra éxito A es la misma para cada una de las experiencias.

La varianza se puede calcular exponencialmente con la probabilidad continua, según el parámetro $\lambda > 0$ cuya función de densidad aparece a continuación:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{para } x \geq 0 \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (\text{Ec. 11})$$

La fórmula de distribución es:

$$F(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - e^{-\lambda x} & \text{para } x \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 12})$$

Además, se puede calcular por medio de una variable aleatoria de distribución uniforme $u = (0,1)$:

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - u) \quad (\text{Ec. 13})$$

A su vez también la varianza se puede calcular mediante la distribución normal, por lo que el cálculo de nuestra variable aleatoria se va a desarrollar por la fórmula:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

μ = la media (promedio)

σ = desviación estándar

σ^2 = varianza

Se realizará el cálculo de la desviación estándar con la fórmula:

$$F \sqrt{\frac{\sum |x - \bar{x}|^2}{n}} \quad (\text{Ec. 15})$$

Desviación estándar = Donde:

x = es un valor de un conjunto de datos

\bar{x} = es la media del conjunto de datos

n = es el número de puntos de datos

Consecuentemente en nuestro estudio se debe realizar el cálculo de la variable o evento continuo para cada tipo elemento de soporte de techo por analizar, con las fórmulas antes mencionadas; de esta manera se espera encontrar el número total de la muestra para el cálculo adecuado del sistema óptimo de soporte de techo.

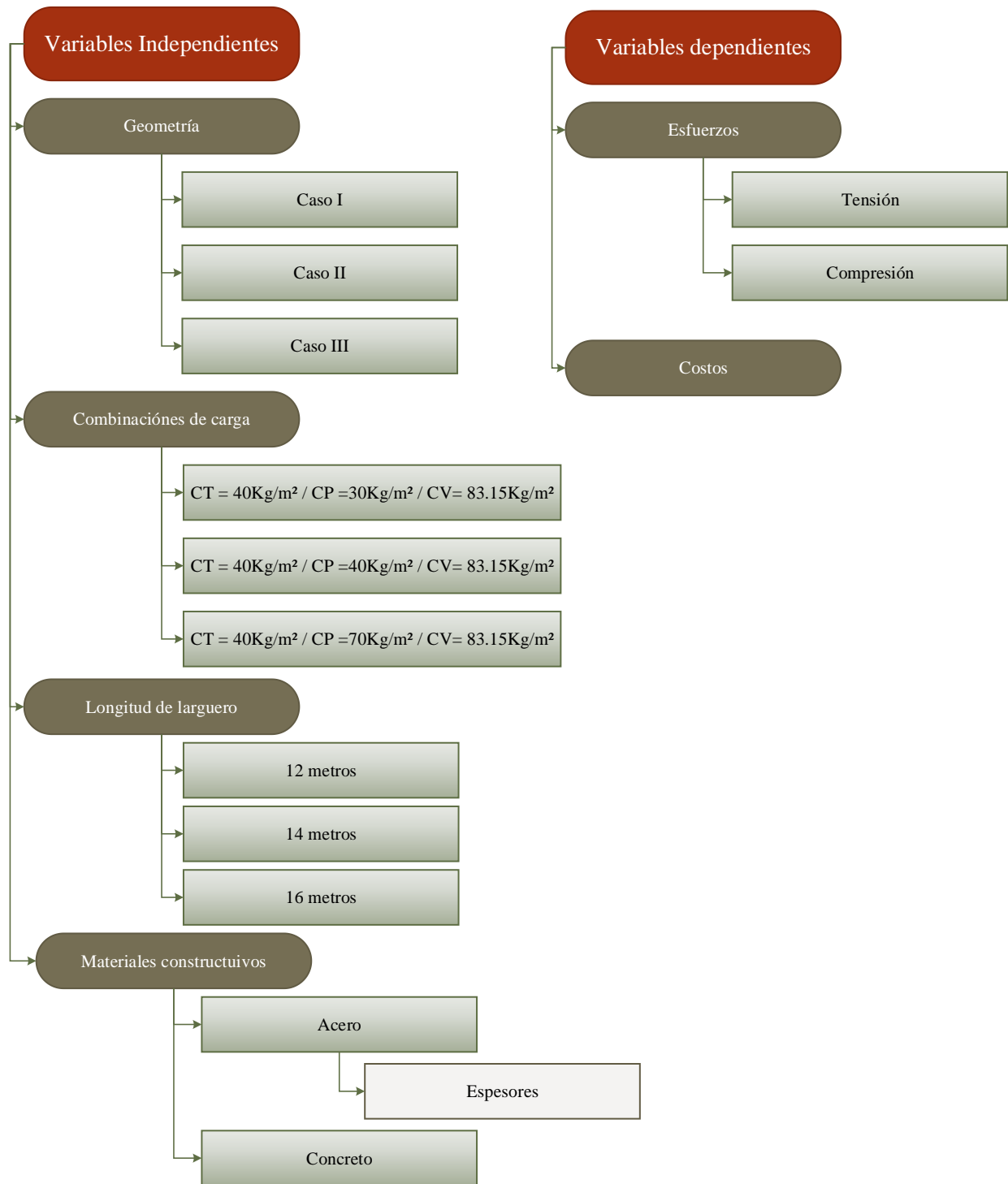


Fig. 30. Esquema de experimento de las variables.

Fuente: Propia.

3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.4.1 Procedimientos específicos

3.4.1.1 Códigos de diseño

Para el diseño de los elementos de acero, ya sea lámina en caliente o en frío, o bien, alma llena o abierta, se utiliza tanto el manual como la especificación del Instituto Americano de Construcción en Acero (*Manual of the American Institute of Steel Construction, A.I.S.C.* por sus siglas en inglés).

Sin embargo, para las estimaciones de carga sísmica y gravitacional en el diseño se siguen los lineamientos establecidos en el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Adicionalmente se toman en cuenta cargas de viento actuantes sobre el techo de la nave industrial, para lo que se sigue el procedimiento establecido en el Código Urbano de Costa Rica, metodología aceptada en Costa Rica, además de ser de fácil aplicación; según la Ing. Giannina Arguedas los resultados son bastante similares a los obtenidos de aplicar otras metodologías más complejas, contenidas en códigos internacionales. (Alfaro D. , 2003).

3.4.1.2 Materiales

Los materiales, ya sea acero o concreto, para el diseño de los largueros se selecciona de acuerdo con la disponibilidad de estos en el mercado nacional, las propiedades utilizadas se asignaron de acuerdo con el proveedor respectivo y lo indicado en los códigos correspondientes.

Módulo de elasticidad

Tradicionalmente se ha dado que el módulo de elasticidad del acero debe ser igual para todos los tipos, pero existen discrepancias entre los manuales A.I.S.C. y A.I.S.I.; esto debido a que el A.I.S.C. establece $2,03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ para el acero lámina en caliente y, el A.I.S.I., $2,07 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ para acero doblado en frío. Para ser congruente con estos códigos se utilizará el correspondiente según su laminación. (*American Institute of Steel, 2004*) (*American Iron and Steel Institute, 2002*)

En el caso del concreto, este no tiene módulo elástico bien definido y el valor varía con las diferentes resistencias de este, con la edad, el tipo de carga, las características, proporciones de cemento y los agregados. (McCormac & Brown, *Diseño de Concreto Reforzado*, 2011).

De acuerdo con el código A.C.I. se establece utilizar la fórmula para el concreto que pese entre 90 y 155lb/pie³.

$$E_c = W_c^{1.5} 33 \sqrt{F'_c} \quad (Ec. 16)$$

Donde,

E_c = Módulo de elasticidad en lb/plg².

W_c = Peso del concreto en lb/pie³.

f'_c = Resistencia a la compresión especificada a los 28 días en lb/plg².

Para concreto con peso normal de 145 lb/pie³, el A.C.I. establece la versión simplificada para determinar el módulo:

$$E_c = 57\,000 \sqrt{F'_c} \quad (Ec. 17)$$

(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011)

Esfuerzo de fluencia

- Angulares: Se utiliza acero A.S.T.M. A36 cuyo esfuerzo de fluencia es 2520 kg/cm².
- Varilla lisa: Las diagonales de los largueros de alma abierta están hechos a partir de acero ASTM A615 con esfuerzo a la fluencia de 2800 kg/cm².
- Perfiles Z: Para este tipo de perfil, doblado en frío el acero es grado 33, con esfuerzo de fluencia de 2310 kg/cm².
- Perfiles W: Se utiliza en grado 50, esfuerzo de fluencia 3500 kg/cm².
- Tubo cuadrado laminado en caliente (tipo H.S.S.): fabricados con acero grado 45, es decir 3220 kg/cm².

(McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017)

“En el caso del concreto, bajo cargas de compresión sostenidas, el concreto continuará deformándose durante largos periodos.(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011).

Por lo anterior, después de ocurre una derogación inicial, la deformación que continúa es la fluencia plástica. Si se deja una carga por mucho tiempo en un solo lugar, entonces la deformación inicial será igual a dos o tres veces las deflexiones iniciales.

(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011), afirma:

“La magnitud de flujo plástico depende mucho de la magnitud de los esfuerzos presentes. Es casi directamente proporcional al esfuerzo mientras el esfuerzo sostenido no sea mayor que aproximadamente la mitad de f'_c . Más allá de este valor, la cedencia crece rápidamente”, (pág. 15).

Factores que afectan la magnitud de fluencia plástica:

- Cuanto mayor sea el tiempo de curado del concreto a la aplicación de las cargas, menor será la fluencia plástica.
- Los concretos de alta resistencia manifiestan una menor fluencia plástica que los de baja resistencia.
- La fluencia plástica aumenta con la temperatura.
- A mayor humedad, menor será el agua del poro libre que puede escapar del concreto.
- Los concretos con el mayor porcentaje de pasta cemento-agua tienen mayor fluencia plástica porque es la pasta y no los agregados, la que fluye plásticamente.
- La adición de refuerzo en las zonas de compresión del concreto reduce mucho la fluencia plástica.
- Los miembros grandes de concreto fluirán más que los miembros delgados pequeños, porque el agua tiene distancias menores para escapar.

(McCormac & Brown, Diseño de Concreto Reforzado, 2011)

Se utiliza el catálogo de la casa distribuidora de Metalco S.A. para tubos de acero laminado en caliente, como se muestra en las imágenes A-1, A-2, A-3 y A-4 del anexo 1, con el fin de verificar la disponibilidad en el mercado costarricense. Par ello se utilizará tubo rectangular o cuadrado.

Además, se utiliza el catálogo de la casa distribuidora Servi Acero Comercial, empresa mexicana encargada de distribuir acero laminado en frío, cuya información se muestra en las imágenes A-5 y A-6 del anexo 1.

3.4.1.3 Cargas

Es importante recalcar que los largueros no forman parte del sistema sismorresistente de la estructura, debido a su función, la cual es brindar apoyo para la cubierta de techo. Estos elementos se modelan simplemente apoyados por lo que no se considera que sus uniones a los marcos sean capaces de transmitir momentos durante las sacudidas sísmicas. Todo lo anterior hace que los largueros se diseñen únicamente para cargas gravitacionales y de viento. (Ugalde, 2008)

Cargas permanentes

Con el fin de que la comparación por realizar fuese únicamente entre largueros, se utilizó para el diseño de todas las propuestas, el mismo tipo de lámina. Para seleccionar la que mejor aprovechase la capacidad de las secciones se evaluaron los 4 tipos básicos más usados en Costa Rica: lámina rectangular, ondulada, y engrapada, y canaleta estructural, según se muestra en la tabla 4 que sigue.

Tabla 4 Cuadro comparativo de separación y pesos de las láminas más utilizadas en Costa Rica.

Tipo de lámina	Separación máxima entre largueros (m)	Peso (kg/m²)
Rectangular, cal. 26.	1,17	4,60
Ondulada, cal. 26.	1,17	4,84
Estructural, cal. 26	3,50	5,65
Grapada, 2" de peralte, cal.26.	2,20	4,82

Fuente: Propia, Ref. (METALCO, 2019)

En todos los cálculos se utiliza lámina estructural y una separación máxima entre largueros de 3,00 m.

Por ende, la carga lineal que genera la cubierta sobre el larguero, para lámina rectangular, es:

$$\omega_c = w_c \cdot b ; w_c = \frac{kg}{m^2}, b = 3,00 m \quad (Ec. 18)$$

Además de la carga de cubierta y del peso propio de cada larguero, se considera una carga permanente adicional variable para prever la colocación de instalaciones electromecánicas.

Entonces, la carga lineal debido al peso se expresa:

$$\omega_{em} = w_{em} \cdot b ; w_{em} = \text{variable } \frac{kg}{m^2}, b = 3,00 m \quad (\text{Ec. 19})$$

Por tanto, se utilizará tres combinaciones de carga permanente para el análisis según los requerimientos del mercado:

1. $30,00 \frac{kg}{m^2}$
2. $40,00 \frac{kg}{m^2}$
3. $70,00 \frac{kg}{m^2}$

Cargas temporales

Se consideran dos condiciones para este efecto:

a) Condición 1

Está dada por el Código Sísmico de Costa Rica 2010, y corresponde a una carga distribuida de 40 kg/m^2 para techos. (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, 2014).

$$\omega_t = w_t \cdot b ; w_t = 40 \frac{kg}{m^2}, b = 3,00 m \quad (\text{Ec. 20})$$

b) Condición 2

Consiste en una carga de 100kg colocada en el centro del larguero, según está establecida en el artículo XXI.5. del Código Urbano. (Alfaro D. , 2003)

$$P_1 = 100,00 \text{ kg} \quad (\text{Ec. 21})$$

Dado que en nuestro país se rige el diseño constructivo con el uso del Código Sísmico de Costa Rica 2010, se excluye para el análisis la condición 2 referente al Código Urbano.

Por tanto, la carga temporal de análisis corresponde a: $40,00 \frac{kg}{m^2}$.

Cargas de viento

Para esta condición se hace referencia al artículo XX.9. Tablas para la presión básica del viento. Esto para tomar en cuenta las presiones de viento ejercidas en los techos, las cuales son de alta importancia para el análisis. Dicho apartado establece los valores mínimos de presión básica que deberán contemplarse para el diseño de construcciones hasta los 100 metros de altura y establece que se deberá interpolar linealmente para alturas intermedias de las anotadas. (Ley de Construcciones y su Reglamento, 2009). Las tablas 5 y 6 muestran las diferentes situaciones dadas en la Ley de Construcciones y su Reglamento 2009.

Tabla 5. Construcciones situadas en la ciudad o en lugares de rugosidad comparable.

Altura sobre el terreno (m).....	Presión básica (kg/m ²)
0.....	55
15.....	75
20.....	85
30.....	95
40.....	105
50.....	110
75.....	120
100.....	130

Fuente: (Ley de Construcciones y su Reglamento, 2009).

Tabla 6. Construcciones en campo abierto frente al mar y sitios similares.

Altura sobre el terreno (m).....	Presión básica (kg/m ²)
0.....	70
1.....	70
7.....	95
10.....	105
15.....	120
20.....	125
30.....	135
40.....	145
50.....	150
75.....	165
100.....	170

Fuente: (Ley de Construcciones y su Reglamento, 2009).

Dado que el análisis será para uso de los soportes de techo exclusivamente en naves industriales, se tomará en cuenta la tabla 10 para construcciones en campo abierto frente al mar y sitios similares. Además, se utilizará una altura sobre el terreno de 10 metros, que es la altura usual en naves industriales. Por tanto, se emplea una presión básica de 105 kg/m².

Por otra parte, haciendo referencia al artículo XX.12. sobre la aplicación de las presiones, se utiliza edificaciones abiertas por el uso que se les da a las naves industriales en Costa Rica y esta es, además, la condición crítica posible.

Según la Ley de Construcciones y su Reglamento 2009 “La fuerza del viento por unidad de superficie se obtiene multiplicándola presión básica “q” por un factor de forma “C”, dependiendo de las condiciones...”; entonces se usa para techos frente al viento.

$$q_{diseño} = q_{básica} * C \quad (Ec. 22)$$

$$C = 1,2 \sin(A - 0,4); \text{ donde: } A = \text{el ángulo de pendiente.} \quad (Ec. 23)$$

(Ley de Construcciones y su Reglamento, 2009)

Entonces,

Se evalúa un techo con una pendiente de 14%, que es lo usual en naves industriales de Costa Rica; y entonces se obtiene de esta manera:

$$A = \tan(\alpha) = \frac{1,4}{10} \quad (Ec. 24)$$

$$A = 7,97^\circ \quad (Ec. 25)$$

Se despeja en la ecuación, para obtener el factor C:

$$C = 1,2 \sin(7,97) - 0,4 ; \text{ donde: } A = 7,97^\circ \quad (Ec. 26)$$

$$C = 0,79 \quad (Ec. 27)$$

Entonces se establece con los datos obtenidos que la presión de diseño para el análisis es de:

$$q_{diseño} = 105,00 \frac{Kg}{m^2} * 0,79 \quad (Ec. 28)$$

$$q_{diseño} = 83,15 \frac{Kg}{m^2} \quad (Ec. 29)$$

Cargas últimas

El Código Sísmico de Costa Rica (C.S.C.R.-10) establece en el capítulo 6, sección 6.2.1 las combinaciones para obtener la carga última de diseño, y establece que todo elemento debe tener capacidad para resistirlas. (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, 2014).

Combinación 1: $CU = 1,4 CP$

Combinación 2: $CU = 1,2 CP + 1,6 f_R CT + 1,6 CE$

Combinación 3: $CU = 1,05 CP + f_1 f_R CT \pm CS + CE$

Combinación 4: $CU = 0,95 CP \pm CS + CE$

Donde:

C.U.: efecto último total, producto de todos los efectos por considerar.

C.P.: efecto de la carga permanente.

C.T.: carga temporal, sin la reducción indicada en el artículo 6-3

C.S.: carga sísmica.

C.E.: carga por empuje.

El factor f_1 esta dado por:

f_1 : 0,5 para edificaciones de baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo.

f_1 : 1,0 para edificaciones con alta probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo, como: bodegas, sitios de reunión pública, estacionamientos públicos.

f_1 : 0,0 para techos.

f_r : factor de reducción de carga temporal según el artículo 6.3. Este expresa: “la reducción de carga temporal es permitida, aunque no obligatoria. No se permite la reducción de la carga temporal

cuando sea menor o igual a $200,00 \text{ kg/m}^2$ ” (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, 2014, págs. (6-5))

Por tanto, para los efectos del cálculo de soportes de techo (largueros), se excluye la combinación 1 y 4 del Código Sísmico de Costa Rica debido a que el diseño no incluye carga sísmica o cargas por empuje y se debe contemplar carga permanente y temporal. Además, se anula el valor de f_r en la combinación 2, debido a lo mencionado en el Código Sísmico de Costa Rica 2010, sección 6,3 y la carga de empuje inexistente para el elemento por evaluar.

Entonces, se aplica:

$$\text{Combinación 2: } CU = 1,2 CP + 1,6 CT$$

$$\text{Combinación 3: } CU = 1,05 CP + f_1 f_R CT \pm CS + CE$$

El factor f_1 esta dado por:

f_1 : 0,0 para techos.

f_r : factor de reducción de carga temporal según el artículo 6.3. Este expresa: “la reducción de carga temporal es permitida, aunque no obligatoria. No se permite la reducción de la carga temporal cuando sea menor o igual a $200,00 \text{ kg/m}^2$ ”. Por tanto, para este análisis no se usará factor de reducción de carga temporal. (Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, 2014, págs. (6-5))

Como resultado de los factores y ecuaciones anteriormente mencionadas, se obtiene la tabla 7, que sigue, con las combinaciones resultantes de la iteración de cargas últimas de acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Tabla 7. Combinaciones resultantes de la iteración de cargas últimas de acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. $\text{kg/m}^2 / \text{kg/m}^2 / \text{kg/m}^2$	Combinación carga última 6 -2	Combinación carga última 6-3
40/30/83,15	100,00 Kg/m^2	114,65 Kg/m^2
40/40/83,15	112,00 Kg/m^2	125,15 Kg/m^2
40/70/83,15	148,00 Kg/m^2	156,65 Kg/m^2

Fuente: Propia.

3.4.1.4 Resistencia nominal a la compresión y tensión del acero

Resistencia nominal a la compresión del acero

Se define como el máximo esfuerzo que se obtiene al someter a un espécimen a una carga axial de compresión, en el cual un elemento estructural se pandea, y en cuanto el elemento se hace más grande el esfuerzo decrece. “Después de que esta alcanza una cierta longitud, ese esfuerzo se habrá reducido al límite proporcional de acero. Para esa longitud y longitudes mayores, el esfuerzo de pandeo será elástico.” (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017).

Para que una columna se pandee elásticamente, deberá ser larga y esbelta. Su carga de pandeo P se puede calcular con la fórmula de Euler siguiente, (McCormac & Csernak, Diseño de Estructuras de Acero, 2017).

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{Ec. 30})$$

La fórmula de Euler es aplicable tanto para elementos estructurales tipo columna, como elementos tipo viga.

Si el elemento no diera estaría en el rango inelástico y, por lo tanto, la ecuación de Euler no es aplicable.

La fórmula de Euler se puede traducir de la siguiente manera, dado que implica la relación de esbeltez del elemento estructural,

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 EI}{L^2 A} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$I = A r^2 \quad (\text{Ec. 32})$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (\text{Ec. 33})$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}; \text{ donde } r_x, r_y \text{ es crítico en el diseño} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde,

F_c = esfuerzo de Euler

E = módulo de elasticidad del acero ($2,1 \times 10^6$ kg/cm²)

L = longitud del elemento

r = radio de giro del elemento

Para tales efectos se define la resistencia nominal en compresión, dada la siguiente ecuación,

$$\phi CP_n = \phi_c F_{cr} A_g \quad (Ec. 35)$$

Donde,

ϕCP_n = Resistencia nominal a la compresión

ϕ_c = Factor de reducción 0,60

F_{cr} = esfuerzo crítico

A_g = área de la sección

Resistencia nominal a la tensión del acero

Para efectos de diseño de elementos que contienen acero se define la capacidad máxima y carga axial en tensión mediante la siguiente expresión,

$$\phi TP_n = \phi_c A_s F_y \quad (Ec. 36)$$

Donde,

ϕCP_n = Resistencia nominal a la compresión (0,90)

ϕ_c = Factor de reducción 0,90

F_{cr} = esfuerzo crítico

A_g = área de la sección

De acuerdo con la información tomada de las tablas anexas A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5 correspondiente a las casas proveedoras de acero: Metalco y Servi Acero, se define de acuerdo

con las ecuaciones anteriores en cuanto a resistencia nominal a la compresión y tensión para cada una de las secciones de acero existentes en dichas casas proveedoras, los datos establecidos en las tablas 8, 9, 10 y 11.

Resistencia nominal a la tensión y compresión del acero laminado en caliente.

Tabla 8. Resistencia nominal y compresión de tubos cuadrados de acero laminado en caliente.

Tubos cuadrados de acero laminados en caliente											
Sección (mm)		Longitud real (cm)	K	r (cm)	Fy (KN/cm ²)	E (KN/cm ²)	A (cm ²)	Fe (KN/cm ²)	Fcr (KN)	φC Pn (KN)	φAs Fy (KN)
50 x 50	1,2	100	1	1,98	22,7	21000	2,28	81,25	20,20	27,63	46,58
50 x 50	1,5	100	1	1,96	22,7	21000	2,81	79,62	20,15	33,97	57,41
50 x 50	1,8	100	1	1,94	22,7	21000	3,33	78,01	20,10	40,15	68,03
50 x 50	2,37	100	1	1,93	22,7	21000	4,37	77,20	20,07	52,63	89,28
50 x 50	3,17	100	1	1,86	22,7	21000	5,51	71,70	19,88	65,69	112,49
72 x 72	1,2	100	1	2,88	22,7	21000	3,34	171,91	21,48	43,04	68,24
72 x 72	1,5	100	1	2,86	22,7	21000	4,13	169,53	21,46	53,18	84,38
72 x 72	1,8	100	1	2,84	22,7	21000	4,92	167,17	21,45	63,24	100,41
72 x 72	2,37	100	1	2,82	22,7	21000	6,44	164,82	21,43	82,83	131,61
72 x 72	3,17	100	1	2,76	22,7	21000	8,30	157,88	21,37	106,39	169,49
91 x 91	1,5	100	1	3,68	22,7	21000	5,33	280,68	21,94	70,18	108,89
91 x 91	1,8	100	1	3,66	22,7	21000	6,36	277,64	21,94	83,64	129,83
100 x 100	1,5	100	1	4,36	22,7	21000	5,81	394,00	22,16	77,29	118,76
100 x 100	1,8	100	1	3,98	22,7	21000	6,93	328,31	22,05	91,71	141,60
100 x 100	2,37	100	1	3,95	22,7	21000	9,05	323,38	22,04	119,69	184,89
100 x 100	3,17	100	1	3,91	22,7	21000	11,85	316,86	22,03	156,59	242,03
100 x 100	4,75	100	1	3,82	22,7	21000	17,13	302,44	22,00	226,08	349,95
150 x 150	2,37	100	1	5,99	22,7	21000	13,81	743,66	22,41	185,70	282,14
150 x 150	3,17	100	1	5,96	22,7	21000	18,19	736,23	22,41	244,53	371,56
150 x 150	4,75	100	1	5,86	22,7	21000	26,63	711,73	22,40	357,88	544,03

Fuente: Propia.

Tabla 9. Resistencia nominal y compresión de tubos rectangulares de acero laminado en caliente.

Tubos rectangulares de acero laminados en caliente											
Sección (mm)	Longitud real (cm)	K	r_y (cm)	Fy (KN/cm ²)	E (KN/cm ²)	A (cm ²)	Fe (KN/cm ²)	Fcr (KN)	ϕC	Pn (KN)	ϕAs Fy (KN)
23 x 96	1,5	50	1	1	22,7	21000	3,4	82,90	20,24	41,29	69,46
23 x 96	1,8	100	1	0,99	22,7	21000	4,06	20,31	14,22	34,64	82,95
25 x 75	1,5	100	1	1,07	22,7	21000	2,81	23,73	15,21	25,64	57,41
25 x 75	1,8	100	1	1,06	22,7	21000	3,35	23,29	15,10	30,34	68,44
38X50	1,8	100	1	1,52	22,7	21000	2,94	47,89	18,61	32,84	60,06
38 x 75	1,5	100	1	1,6	22,7	21000	3,2	53,06	18,98	36,44	65,38
38 x 75	1,8	100	1	1,59	22,7	21000	3,8	52,40	18,94	43,17	77,63
48 x 72	1,5	100	1	1,98	22,7	21000	3,41	81,25	20,20	41,32	69,67
48 x 72	1,8	100	1	1,97	22,7	21000	4,08	80,44	20,17	49,38	83,35
48 x 72	2,37	100	1	1,93	22,7	21000	5,24	77,20	20,07	63,10	107,05
48 x 96	1,5	100	1	0,46	22,7	21000	4,13	4,39	2,60	6,45	84,38
48 x 96	1,8	100	1	2,03	22,7	21000	4,94	85,41	20,31	60,20	100,92
48 x 96	2,37	100	1	2	22,7	21000	6,38	82,90	20,24	77,49	130,34
48 x 96	3,17	100	1	1,95	22,7	21000	8,29	78,81	20,12	100,09	169,36
50 x 150	1,5	100	1	2,21	22,7	21000	5,81	101,23	20,67	72,04	118,70
50 x 150	1,8	100	1	2,2	22,7	21000	6,97	100,31	20,65	86,35	142,40
50 x 150	2,37	100	1	2,17	22,7	21000	9,05	97,60	20,59	111,83	184,89
50 x 150	3,17	100	1	2,13	22,7	21000	11,85	94,03	20,52	145,89	242,10
50 x 150	4,75	100	1	2,11	22,7	21000	17,88	92,27	20,48	219,70	365,29
50 x 200	2,37	100	1	2,22	22,7	21000	11,43	102,15	20,68	141,85	233,51
50 x 200	3,17	100	1	2,18	22,7	21000	15,02	98,50	20,61	185,76	306,86
100 x 150	2,37	100	1	4,17	22,7	21000	11,43	360,41	22,11	151,63	233,51
100 x 150	3,17	100	1	4,13	22,7	21000	15,02	353,52	22,10	199,15	306,86
100 x 150	4,75	100	1	4,04	22,7	21000	21,88	338,28	22,07	289,75	447,01
100 x 200	2,37	100	1	4,29	22,7	21000	13,81	381,45	22,14	183,47	282,14
100 x 200	3,17	100	1	4,26	22,7	21000	18,19	376,13	22,13	241,57	371,62
100 x 200	4,75	100	1	4,18	22,7	21000	26,62	362,14	22,11	353,18	543,85

Fuente: Propia.

Resistencia nominal a la tensión y compresión del acero laminado en frío

Tabla 10. Resistencia nominal y compresión de tubos cuadrados de acero laminado en frío. *Fuente: Propia.*

Tubos cuadrados HSS de acero laminados en frío										
Sección (mm)	Longitud real (cm)	K	r (cm)	Fy (KN/cm ²)	E (KN/cm ²)	A (cm ²)	Fe (KN/cm ²)	Fcr (KN)	φC Pn (KN)	φAs Fy (KN)
100 x 100	12,7	100	3,56	28,84	21000	38,84	262,68	27,54	641,90	1008,13
100 x 100	9,52	100	3,71	28,84	21000	30,84	285,28	27,65	511,55	800,48
100 x 100	7,94	100	3,78	28,84	21000	26,39	296,14	27,69	438,41	684,98
100 x 100	6,35	100	3,86	28,84	21000	21,68	308,81	27,73	360,77	562,73
127 x 127	12,7	100	4,6	28,84	21000	50,84	438,57	28,06	855,85	1319,60
127 x 127	9,52	100	4,75	28,84	21000	39,87	467,63	28,11	672,33	1034,87
127 x 127	7,94	100	4,83	28,84	21000	33,94	483,52	28,13	572,82	880,95
127 x 127	6,35	100	4,9	28,84	21000	27,68	497,64	28,15	467,50	718,46
127 x 127	4,76	100	4,97	28,84	21000	21,1	511,96	28,17	356,61	547,67
152 x 152	15,87	100	5,51	28,84	21000	75,48	629,25	28,29	1281,29	1959,16
152 x 152	9,52	100	5,79	28,84	21000	48,84	694,83	28,34	830,57	1267,69
152 x 152	12,7	100	5,64	28,84	21000	62,84	659,29	28,32	1067,66	1631,08
152 x 152	7,94	100	5,87	28,84	21000	41,42	714,16	28,36	704,72	1075,10
152 x 152	6,35	100	5,94	28,84	21000	33,68	731,29	28,37	573,26	874,20
152 x 152	4,76	100	6,01	28,84	21000	25,5	748,63	28,38	434,19	661,88
203 x 203	15,87	100	7,59	28,84	21000	105,81	1194,00	28,55	1812,52	2746,40
203 x 203	12,7	100	7,72	28,84	21000	87,1	1235,25	28,56	1492,52	2260,77
203 x 203	9,52	100	7,87	28,84	21000	67,1	1283,71	28,57	1150,23	1741,65
203 x 203	7,94	100	7,95	28,84	21000	56,39	1309,95	28,58	966,82	1463,66
203 x 203	6,35	100	8,03	28,84	21000	45,68	1336,44	28,58	783,34	1185,67
203 x 203	4,76	100	8,09	28,84	21000	34,5	1356,49	28,58	591,70	895,48
254 x 254	15,87	100	9,65	28,84	21000	135,48	1930,07	28,66	2329,73	3516,52
254 x 254	12,7	100	9,8	28,84	21000	110,97	1990,54	28,67	1908,62	2880,34
254 x 254	9,52	100	9,96	28,84	21000	85,16	2056,07	28,67	1464,98	2210,41
254 x 254	7,94	100	10,01	28,84	21000	71,61	2076,76	28,67	1231,96	1858,71
254 x 254	6,35	100	10,08	28,84	21000	57,68	2105,91	28,68	992,39	1497,14
254 x 254	4,76	100	10,2	28,84	21000	43,4	2156,35	28,68	746,80	1126,49
304 x 304	15,87	100	11,73	28,84	21000	165,81	2851,77	28,72	2857,06	4303,76
304 x 304	12,7	100	11,89	28,84	21000	134,84	2930,10	28,72	2323,68	3499,91
304 x 304	9,52	100	12,01	28,84	21000	102,58	2989,54	28,72	1767,89	2662,57
304 x 304	7,94	100	12,09	28,84	21000	86,45	3029,50	28,73	1489,98	2243,90
304 x 304	6,35	100	12,17	28,84	21000	69,68	3069,73	28,73	1201,01	1808,61
355 x 355	12,7	100	14	28,84	21000	159	4062,33	28,75	2743,17	4127,00
355 x 355	9,52	100	14,1	28,84	21000	121	4120,57	28,76	2087,66	3140,68
355 x 355	7,94	100	14,2	28,84	21000	102	4179,22	28,76	1759,92	2647,51
406 x 406	12,7	100	16	28,84	21000	183	5305,90	28,77	3159,44	4749,95
406 x 406	9,52	100	16,2	28,84	21000	139	5439,38	28,78	2399,92	3607,88
406 x 406	7,94	100	16,2	28,84	21000	117,00	5439,38	28,78	2020,08	3036,85

Tabla 11. Resistencia nominal y compresión de tubos rectangulares de acero laminado en frío.

Tubos rectangulares HSS de acero laminados en frío												
Sección (mm)	Longitud real (cm)	K	ry (cm)	Fy (KN/cm ²)	E (KN/cm ²)	A (cm ²)	Fe (KN/cm ²)	Fcr (KN)	φC Pn (KN)	φAs Fy (KN)		
127 x 76	6,35	100	1	3,03	28,84	21000	21,7	190,28	27,07	352,42	563,25	
127 x 76	4,76	100	1	3,1	28,84	21000	16,6	199,18	27,14	270,36	430,87	
152 x 101	12,7	100	1	3,81	28,84	21000	50,84	300,86	27,71	845,14	1319,60	
152 x 101	9,52	100	1	3,94	28,84	21000	39,87	321,74	27,78	664,51	1034,87	
152 x 101	7,94	100	1	4,01	28,84	21000	34	333,28	27,81	567,41	882,50	
152 x 101	6,35	100	1	4,09	28,84	21000	27,68	346,71	27,85	462,59	718,46	
152 x 101	4,76	100	1	4,15	28,84	21000	21,1	356,96	27,88	352,97	547,67	
203 x 76	6,35	100	1	3,18	28,84	21000	30,7	209,59	27,23	501,50	796,85	
203 x 76	4,76	100	1	3,25	28,84	21000	34	218,92	27,29	556,77	882,50	
203 x 101	12,7	100	1	3,96	28,84	21000	62,84	325,02	27,79	1047,74	1631,08	
203 x 101	9,52	100	1	4,09	28,84	21000	48,84	346,71	27,85	816,21	1267,69	
203 x 101	6,35	100	1	4,22	28,84	21000	33,68	369,10	27,91	564,05	874,20	
203 x 152	12,7	100	1	5,89	28,84	21000	74,84	719,03	28,36	1273,47	1942,55	
203 x 152	9,52	100	1	6,02	28,84	21000	57,87	751,12	28,38	985,42	1502,07	
203 x 152	6,35	100	1	6,17	28,84	21000	39,68	789,02	28,40	676,20	1029,93	
203 x 152	4,76	100	1	6,24	28,84	21000	30	807,03	28,41	511,41	778,68	
254 x 101	9,52	100	1	4,17	28,84	21000	57,87	360,41	27,89	968,40	1502,07	
254 x 101	6,35	100	1	4,32	28,84	21000	39,68	386,80	27,95	665,53	1029,93	
254 x 152	12,7	100	1	6,07	28,84	21000	87,1	763,65	28,39	1483,54	2260,77	
254 x 152	9,52	100	1	6,2	28,84	21000	67,1	796,71	28,41	1143,64	1741,65	
254 x 152	6,35	100	1	6,32	28,84	21000	45,68	827,85	28,42	779,00	1185,67	
254 x 203	12,7	100	1	7,98	28,84	21000	98,71	1319,85	28,58	1692,53	2562,12	
254 x 203	9,52	100	1	8,1	28,84	21000	76,13	1359,84	28,59	1305,71	1976,03	
254 x 203	6,35	100	1	8,26	28,84	21000	51,68	1414,10	28,59	886,67	1341,41	
304 x 152	12,7	100	1	6,2	28,84	21000	98,71	796,71	28,41	1682,39	2562,12	
304 x 152	9,52	100	1	6,32	28,84	21000	76,13	827,85	28,42	1298,28	1976,03	
304 x 152	6,35	100	1	6,45	28,84	21000	51,68	862,26	28,44	881,84	1341,41	
304 x 203	12,7	100	1	8,15	28,84	21000	110,97	1376,68	28,59	1903,46	2880,34	
304 x 203	9,52	100	1	8,31	28,84	21000	85,16	1431,27	28,60	1461,23	2210,41	
304 x 203	6,35	100	1	8,43	28,84	21000	57,68	1472,90	28,60	989,95	1497,14	
355 x 152	12,7	100	1	6,3	28,84	21000	110,97	822,62	28,42	1892,25	2880,34	
355 x 152	9,52	100	1	6,43	28,84	21000	85,16	856,92	28,44	1453,00	2210,41	
355 x 152	6,35	100	1	6,55	28,84	21000	57,68	889,20	28,45	984,64	1497,14	
355 x 203	12,7	100	1	8,43	28,84	21000	134,84	1472,90	28,60	2314,23	3499,91	
355 x 203	9,52	100	1	8,56	28,84	21000	102,58	1518,68	28,61	1760,99	2662,57	
355 x 203	6,35	100	1	8,69	28,84	21000	69,68	1565,16	28,62	1196,48	1808,61	

Fuente: Propia.

3.4.2 Softwares

3.4.2.1 SAP 2000

Para el diseño y revisión de los datos se usa como herramienta principal el *software* de análisis estructural SAP 2000, en el cual se analizan las deformaciones tanto por carga axial como los momentos flectores que afectan cada uno de los diseños de soportes de techo. Tal como se observa en la figura 31, el análisis de un elemento mediante el *software* de trabajo SAP 2000.



*Fig. 31 Software de trabajo SAP 2000.
Fuente: Propia.*

3.5 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de datos

Para el análisis de datos, se utiliza el *software* de análisis estructural SAP 2000 versión 19, como se muestra en la imagen 31, el cual es un programa de elementos finitos para modelado, análisis y dimensionamiento de cualquier estructura. Según su distribuidor CSI “conocido por la flexibilidad en al tipo de estructuras que permite analizar, por su poder de cálculo y por la fiabilidad de los resultados, SAP 2000 es la herramienta de trabajo diaria para varios ingenieros”. Por lo anterior se garantiza la confiabilidad del programa por su distribuidor e incluye mejoras continuas a lo largo de 4 décadas de desarrollo e implementación.

Dentro de sus principales propiedades:

- Flexibilidad y capacidad de los objetos de barra y *links*.
- Configuración y geometría de secciones sin límites.

- Excentricidades y control de conectividad entre nudos.
- Definición de espesores, presiones y cargas paramétricas variables.
- Facilidad en la aplicación de cargas de paneles distribuidas en barras.
- Posibilidad de modelado con objetos de área no lineales por capas.
- Comportamiento geoméricamente no lineal.
- Integración automática de esfuerzos en elementos finitos.
- Análisis “*push over*” y rótulas plásticas.
- Excelencia en análisis dinámicos.
- Flexibilidad del motor de cálculo.
- Secuencia constructiva y efectos diferidos en el tiempo.
- Simplicidad en la simulación de pretensado.
- Optimizador estructural.
- Dimensionamiento de estructuras y normativas internacionales.
- Modelado con cables estructurales.
- Edición interactiva del modelo mediante Excel.
- Acceso por medio de API para creación de pre y post procesadores.
(*CSI Computers & Structures, INC, 2019*)

3.6 Cronograma de trabajo

En la figura 32 siguiente se muestra el cronograma de trabajo establecido.

Fig. 32 Cronograma.

Actividad	Cuatrimestre														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Inicio del TFG	■														
Reunión con tutor	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Reunión con lector	■				■				■			■			
Entrega del 1er informe parcial				■											
Entrega del 2do informe parcial								■							
Analizar las propuestas mediante <i>software</i>	■	■	■	■											
Realizar matriz de comparación de desempeño estructural para las propuestas con sus deformaciones					■										
Evaluar las propuestas y determinar la de mayor desempeño estructural					■										
Realizar una matriz comparativa de costos para cada propuesta estructuralmente factible y generar indicadores de costo para cada una de ellas						■	■	■							
Evaluar el resultado final de los análisis realizados y posibles soluciones de láminas de techo con las deformaciones halladas.									■	■					
Generar la propuesta de sistema óptimo											■	■			
Entrega del borrador final al tutor													■		
Entrega del borrador final al lector														■	
Defensa de TFG															■

Fuente: Propia.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados del diseño estructural: propuestas alternativas para el sistema de largueros en naves industriales de concreto prefabricado.

4.1.1 Caso 1

Paso 1: Propuesta dimensionamiento.

Consta de dos tubos estructurales cuadrados de 50 mm x 50 mm x 1,50 mm corridos en la parte inferior y un tubo estructural cuadrado corrido de 72 mm x 72 mm x 3,17 mm en la parte superior, unidos entre sí con piezas de tubo estructural cuadrado con la misma configuración al utilizado en la zona inferior, con separación a cada metro de distancia entre ellos, tal como se muestra en las figuras 34 y 35. La longitud del soporte de techo varía desde 12, 14 y 16 metros. Se realiza el análisis utilizando el método de estructura simplemente apoyada con carga distribuida de acuerdo con las combinaciones de carga propuestas.

Se utiliza un pre - dimensionamiento de tubos donde el tubo superior está definido por As_1 (área real del acero) y los tubos inferiores por As_2 (área real del acero) y As_3 (área real del acero), como se muestra en la figura 33 que sigue.

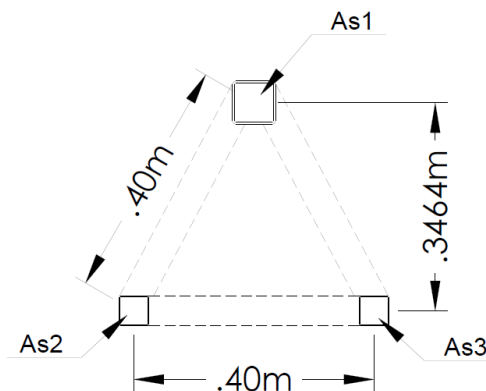


Fig. 33 Diseño geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 1.

Fuente: Propia.

Donde rige la equivalencia.

$$A_{S1} \geq A_{S2} + A_{S3} \quad (\text{Ec. 37})$$

$$8,30 \text{ cm}^2 \geq 2,81\text{cm}^2 + 2,81\text{cm}^2 \quad (\text{Ec. 38})$$

$$8,30 \text{ cm}^2 \geq 5,62\text{cm}^2 \quad (\text{Ec. 39})$$

$$\therefore \text{cumple} \quad (\text{Ec. 40})$$

Paso 2: Diseño en tensión y compresión crítica.

El diseño consiste en la revisión de la tensión y compresión crítica ejercida por la aplicación de cargas últimas en el sistema de soporte techos, tanto en el tubo superior como los inferiores, tal como se describe en las tablas 12 y 13 que siguen.

Tabla 12. Cargas axiales críticas en tensión (tubo inferior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 1.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	83,89 KN	114,86 KN	150,59 KN
40/40/83,15	91,58 KN	125,38 KN	164,38 KN
40/70/83,15	114,63 KN	156,94 KN	205,76 KN

Fuente: Propia.

Tabla 13. Cargas axiales críticas en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 1.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	167,79 KN	229,72 KN	301,19 KN
40/40/83,15	183,16 KN	250,76 KN	328,77 KN
40/70/83,15	229,26 KN	313,88 KN	411,52 KN

Fuente: Propia.

Paso 3: Propuesta diseño geométrico.

Corresponde al diseño geométrico respe.o a las cargas críticas, tanto compresión como tensión del sistema de soporte de techo, con las especificaciones de tubos laminados en frío y en caliente, como se describe en las tablas 14 y 15 que siguen.

Tabla 14. Diseño de acero en compresión para el caso 1.

Diseño en compresión (Tubo superior)						
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud de soporte de techo (m)	Carga Axial demanda crítica (en compresión) (KN)	Sección propuesta (mm)	$\phi_c P_n$ Propuesta sección nueva (KN)	Resultado sección geométrica demanda crítica \leq $\phi_c P_n$	% demanda
40 / 30 / 83,15	12	167,79	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	74%
	14	229,72	100 x 100 x 4,75	226,08	aceptable	102%
	16	301,19	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	83%
40 / 40 / 83,15	12	183,16	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	81%
	14	250,76	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	70%
	16	328,77	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	91%
40 / 70 / 83,15	12	229,26	100 x 100 x 4,75	226,08	aceptable	101%
	14	313,88	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	87%
	16	411,52	100 x 100 x 7,94	438,41	cumple	94%

Fuente: Propia.

Tabla 15. Diseño de acero en tensión para el caso 1.

Diseño en tensión (Tubo inferior)						
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud de soporte de techo (m)	Carga axial demanda crítica (en tensión) (KN)	Sección propuesta (mm)	ϕ As Fy Propuesta sección nueva (KN)	Resultado sección geométrica demanda crítica \leq ϕ As Fy	% demanda
40 / 30 / 83,15	12	83,89	72 x 72 x 1,50	84,38	cumple	99%
	14	114,86	100 x 100 x 1,50	118,76	cumple	97%
	16	150,59	72 x 72 x 3,17	169,49	cumple	89%
40 / 40 / 83,15	12	91,58	72 x 72 x 1,80	100,41	cumple	91%
	14	125,38	72 x 72 x 2,37	131,61	cumple	95%
	16	164,38	72 x 72 x 3,17	169,49	cumple	97%
40 / 70 / 83,15	12	114,63	100 x 100 x 1,50	118,76	cumple	97%
	14	156,94	72 x 72 x 3,17	169,94	cumple	92%
	16	205,76	100 x 100 x 3,17	242,03	cumple	85%

Fuente: Propia.

Paso 4: Diseño estructural final.

Se define el diseño final de acero para toda la sección longitudinal, y se procede a optimizar el sistema, de ser posible, como se muestra en las tablas 16 y 17 que siguen.

Tabla 16 Diseño optimizado de acero en compresión para el caso 1.

Diseño en compresión (Tubo superior)									
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta (mm)	Longitud de sección al centro (m)	Longitud de sección a los extremos reducida (m)	P _{crítico} en reducción (KN)	Sección reducida propuesta (mm)	φ _c P _n Propuesta sección reducida (KN)	Resultado sección geométrica P _{cr} ≤ φ _c P _n	% de aceptación
40 / 30 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	6	3	110,73	100 x 100 x 2,37	119,69	cumple	93%
	14	100 x 100 x 4,75	8	3	134,57	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	86%
	16	100 x 100 x 6,35	8	4	205,93	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	91%
40 / 40 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	6	3	120,87	100 x 100 x 2,37	119,69	acceptable	101%
	14	100 x 100 x 6,35	6	4	188,38	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	83%
	16	100 x 100 x 6,35	8	4	224,79	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	99%
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	6	3	151,30	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	97%
	14	100 x 100 x 6,35	8	3	183,87	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	81%
	16	100 x 100 x 7,94	6	5	333,41	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	92%

Fuente: Propia.

Tabla 17 Diseño optimizado de acero en tensión para el caso 1.

Diseño en tensión (Tubo inferior)									
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta (mm)	Longitud de sección al centro (m)	Longitud de sección a los extremos reducida (m)	Pcrítico en reducción (KN)	Sección propuesta (mm)	$\phi As Fy$ Propuesta sección reducida (KN)	Resultado Sección geométrica $Pcr \leq \phi As Fy$	% de aceptación
40 / 30 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	6	3	55,36	72 x 72 x 1,20	68,24	cumple	81%
	14	100 x 100 x 1,50	14	0	-	-	-	cumple	
	16	72 x 72 x 3,17	6	5	122,01	72 x 72 x 2,37	131,61	cumple	93%
40 / 40 / 83,15	12	72 x 72 x 1,80	6	3	60,43	72 x 72 x 1,20	68,24	cumple	89%
	14	72 x 72 x 2,37	6	4	94,19	72 x 72 x 1,80	100,41	cumple	94%
	16	72 x 72 x 3,17	8	4	112,39	72 x 72 x 2,37	131,61	cumple	85%
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 1,50	12	0	-	-	-	cumple	
	14	72 x 72 x 3,17	6	4	117,90	72 x 72 x 2,37	131,61	cumple	90%
	16	100 x 100 x 3,17	6	5	166,70	100 x 100 x 2,37	184,89	cumple	90%

Fuente: Propia.

4.1.2 Caso 2

Paso 1: Propuesta dimensionamiento.

Su estructura es similar al caso 1, consta de dos tubos estructurales cuadrados de 50 mm x 50 mm x 1,8 mm corridos en la parte inferior y un tubo estructural cuadrado corrido de 72 mm x 72 mm x 3,17 mm en la parte superior; sin embargo, su diferencia radica en los tubos unidos entre sí con piezas de tubo estructural cuadrado 50 mm x 50 mm x 1,8 mm a cada metro de distancia entre ellos, los cuales se colocarán en forma diagonal y unidos a los 50 cm de distancia entre ellos por consiguiente conformando la convergencia de 4 puntos cada 50 cm, como se muestra en las figuras 37 y 38. La longitud del soporte de techo varía desde los 12, 14 y 16 metros. Se realiza el análisis utilizando el método de estructura simplemente apoyada con carga distribuida de acuerdo con las combinaciones de carga propuestas.

Se utiliza un pre - dimensionamiento de tubos, donde el tubo superior está definido por A_{S1} (área real del acero) y los tubos inferiores por A_{S2} (área real del acero) y A_{S3} (área real del acero), como se muestra en la imagen 36 que sigue.

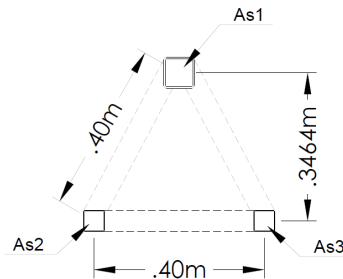


Fig. 36 Diseño geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 2

Fuente: Propia

Donde rige la equivalencia.

$$A_{S1} \geq A_{S2} + A_{S3} \tag{Ec. 41}$$

$$8,30 \text{ cm}^2 \geq 2,81 \text{ cm}^2 + 2,81 \text{ cm}^2 \tag{Ec. 42}$$

$$8,30 \text{ cm}^2 \geq 5,62 \text{ cm}^2 \tag{Ec. 43}$$

$$\therefore \text{cumple} \tag{Ec. 44}$$

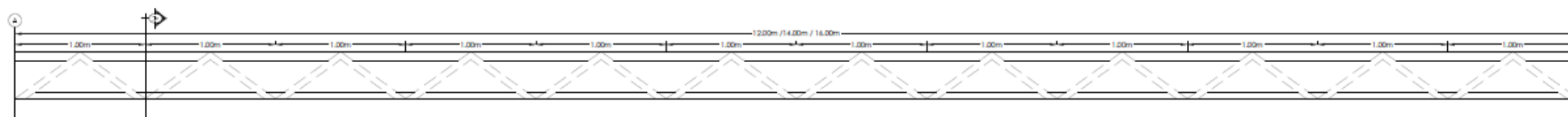


Fig. 38. Diseño soporte de techo para la propuesta 1 del caso 2, longitud variable.

Fuente: Propia.

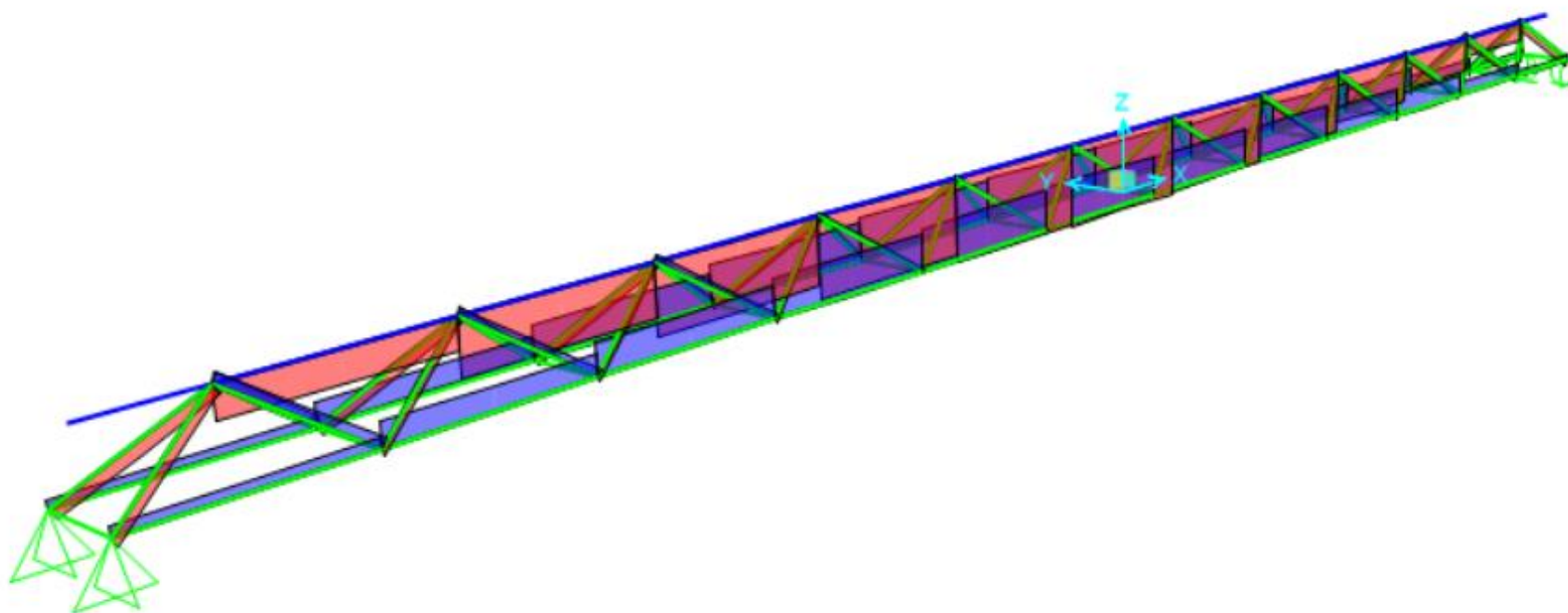


Fig. 37. Perspectiva de soporte de techo para el caso 2, longitud variable con condiciones de apoyo.

Fuente: Propia.

Paso 2: Diseño en tensión y compresión crítica.

El diseño consiste en la revisión de la tensión y compresión crítica ejercida por la aplicación de cargas últimas en el sistema de soporte techos, tanto en el tubo superior como los inferiores, tal como se describe en las tablas 18 y 19 que siguen.

Tabla 18. Cargas axiales críticas en tensión (tubo inferior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 2.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	84,98 KN	115,76 KN	151,27 KN
40/40/83,15	92,76 KN	126,36 KN	165,13 KN
40/70/83,15	116,11 KN	158,17 KN	206,69 KN

Fuente: Propia.

Tabla 19 Cargas axiales críticas en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 2.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	170,73 KN	232,55 KN	303,87 KN
40/40/83,15	186,36 KN	253,84 KN	331,70 KN
40/70/83,15	233,27 KN	317,74 KN	415,19 KN

Fuente: Propia.

Paso 3: Propuesta diseño geométrico.

Corresponde al diseño geométrico respecto a las cargas críticas, tanto compresión como tensión del sistema de soporte de techo, con las especificaciones de tubos laminados en frío y en caliente, como se describe en las tablas 20 y 21 que siguen.

Tabla 20. Diseño de acero en compresión para el caso 1.

Diseño en compresión (Tubo superior)						
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud de soporte de techo (m)	Carga Axial demanda crítica (en compresión) (KN)	Sección Propuesta (mm)	$\phi_c P_n$ Propuesta sección nueva (KN)	Resultado sección geométrica demanda crítica \leq $\phi_c P_n$	% demanda
40 / 30 / 83,15	12	170,73	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	76%
	14	232,55	100 x 100 x 4,75	226,08	aceptable	103%
	16	303,87	100 x 100 x 4,75	349,95	cumple	87%
40 / 40 / 83,15	12	186,36	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	82%
	14	253,84	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	70%
	16	331,70	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	92%
40 / 70 / 83,15	12	233,27	100 x 100 x 4,75	226,08	aceptable	103%
	14	317,74	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	88%
	16	415,19	100 x 100 x 7,94	438,41	cumple	95%

Fuente: Propia.

Tabla 21. Diseño de acero en tensión para el caso 1.

Diseño en tensión (Tubo inferior)						
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud de soporte de techo (m)	Carga axial demanda crítica (en tensión) (KN)	Sección propuesta (mm)	$\phi_c P_n$ Propuesta sección nueva (KN)	Resultado sección geométrica demanda crítica \leq $\phi_c P_n$	% demanda
40 / 30 / 83,15	12	84,98	72 x 72 x 1,50	84,38	aceptable	101%
	14	115,76	100 x 100 x 1,50	118,76	cumple	97%
	16	151,27	72 x 72 x 3,17	169,49	cumple	89%
40 / 40 / 83,15	12	92,76	72 x 72 x 1,80	100,41	cumple	92%
	14	126,36	91 x 91 x 1,80	129,83	cumple	97%
	16	165,13	72 x 72 x 3,17	169,49	cumple	97%
40 / 70 / 83,15	12	116,11	100 x 100 x 1,50	118,76	cumple	98%
	14	158,17	72 x 72 x 3,17	169,49	cumple	93%
	16	206,69	100 x 100 x 3,17	242,03	cumple	85%

Fuente: Propia.

Paso 4: Diseño estructural final.

Se define el diseño final de acero para toda la sección longitudinal, y se procede a optimizar el sistema, de ser posible, como se muestra en las tablas 22 y 23 que siguen.

Tabla 22 Diseño optimizado de acero en compresión para el caso 2.

Diseño en compresión (Tubo superior)									
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta (mm)	Longitud de sección al centro (m)	Longitud de sección a los extremos reducida (m)	P _{crítico} en reducción (KN)	Sección reducida propuesta (mm)	φ _c P _n Propuesta sección reducida (KN)	Resultado sección geométrica P _{cr} ≤ φ _c P _n	% de aceptación
40 / 30 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	5	3,5	127,93	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	82%
	14	100 x 100 x 4,75	7	3,5	156,46	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	100%
	16	100 x 100 x 4,75	11	2,5	132,67	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	85%
40 / 40 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	5	3,5	139,65	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	89%
	14	100 x 100 x 6,35	5	4,5	207,13	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	92%
	16	100 x 100 x 6,35	9	3,5	201,94	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	89%
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	7	2,5	129,30	100 x 100 x 3,17	156,59	cumple	83%
	14	100 x 100 x 6,35	7	3,5	213,78	100 x 100 x 4,75	226,08	cumple	95%
	16	100 x 100 x 7,94	5	5,5	356,72	100 x 100 x 6,35	360,77	cumple	99%

Fuente: Propia.

Tabla 23 Diseño optimizado de acero en tensión para el caso 2.

Diseño en tensión (Tubo inferior)									
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta (mm)	Longitud de sección al centro (m)	Longitud de sección a los extremos reducida (m)	Pcrítico en reducción (KN)	Sección propuesta (mm)	$\phi As F_y$ Propuesta sección reducida (KN)	Resultado sección geométrica $P_{cr} \leq \phi As F_y$	% de aceptación
40 / 30 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	6	3	56,58	72 x 72 x 1,20	68,24	cumple	83%
	14	100 x 100 x 1,50	14	0	-	-	-	cumple	
	16	72 x 72 x 3,17	6	5	122,86	72 x 72 x 2,37	131,61	cumple	93%
40 / 40 / 83,15	12	72 x 72 x 1,80	6	3	61,76	72 x 72 x 1,20	68,24	cumple	91%
	14	91 x 91 x 1,80	14	0	-	-	-	cumple	
	16	72 x 72 x 3,17	6	5	134,11	72 x 72 x 2,37	131,61	aceptable	102%
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 1,50	12	0	-	-	-	cumple	
	14	72 x 72 x 3,17	6	4	119,34	72 x 72 x 2,37	131,61	cumple	91%
	16	100 x 100 x 3,17	6	5	167,87	100 x 100 x 2,37	184,89	cumple	91%

Fuente: Propia.

4.1.3 Caso 3

Paso 1: Propuesta dimensionamiento.

Consta de una placa de concreto reforzado en la zona superior de treinta centímetros de ancho por seis de espesor, reforzada con una malla fabricada en varilla deformada # 3, grado 60 a cada quince centímetros de distancia en ambas direcciones. En la zona inferior de elemento se utiliza un pre - dimensionamiento de tubos de acero estructural corrido, utilizando el dimensionamiento obtenido en los casos 1 y 2 como “A_{s2}” y “A_{s3}” como “amarre” entre la placa de concreto superior y los tubos de acero estructural corrido en la zona inferior, se utiliza también, tubo de acero estructural con el dimensionamiento obtenido en los casos 1 y 2 como “A_{s2}” y “A_{s3}”, la estructura geometría propuesta se puede observar en la figura 39. En las figuras 40 y 41 se muestra la sección variable propuesta, la cual va desde veinticinco centímetros a los extremos hasta cuarenta centímetros en el centro de la sección, dicho propuesta de diseño en sección variable se realiza con el fin de que dicha geometría contrarreste el momento generado por la placa.

Al igual que en los casos 1 y 2, el análisis estructural se realiza con el método de estructura simplemente apoyada con cargas distribuidas en la zona superior del elemento, además se analizará en dimensiones de 12, 14 y 16 metros de longitud.

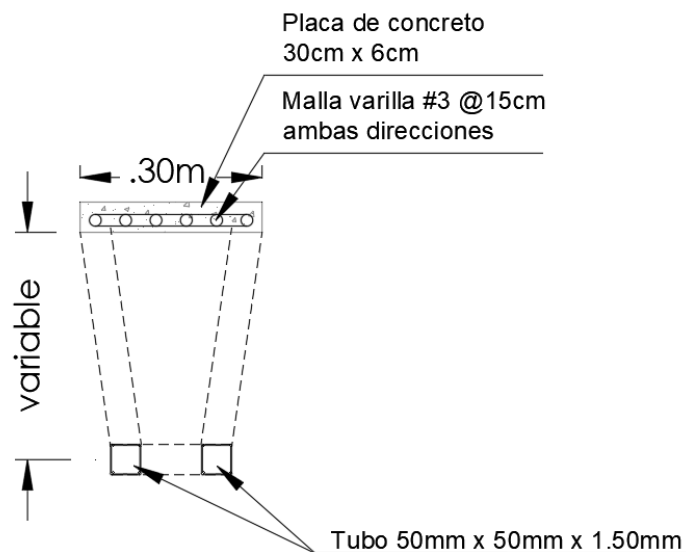
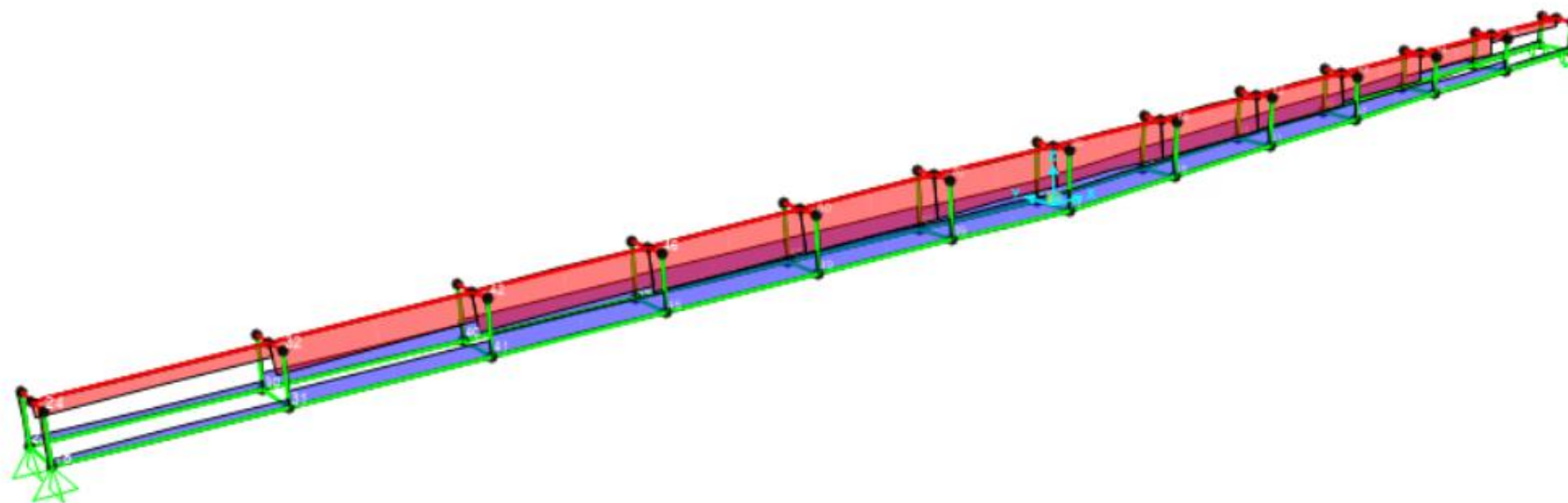


Fig. 39 Diseño geometría de trabajo para la sección A-A de soporte de techo para el caso 3.

Fuente: Propia.



*Fig. 40 Diseño soporte de techo para la propuesta del caso 3, longitud variable.
Fuente: Propia.*



*Fig. 41 Perspectiva de soporte de techo para el caso 3, longitud variable con condiciones de apoyo.
Fuente: Propia.*

Paso 2: Diseño en tensión y compresión crítica.

El diseño consiste en la revisión de la tensión y compresión crítica ejercida por la aplicación de cargas últimas en el sistema de soporte de techos, tanto en el tubo superior como los inferiores, tal como se describe en las tablas 24 y 25 que siguen.

Tabla 24. Cargas axiales críticas en tensión (tubo inferior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 3.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	77,04 KN	105,93 KN	138,58 KN
40/40/83,15	84,09 KN	115,63 KN	151,28 KN
40/70/83,15	105,26 KN	144,74 KN	189,35 KN

Fuente: Propia.

Tabla 25 Cargas axiales críticas en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 3.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	154,02 KN	211,81 KN	277,12 KN
40/40/83,15	168,12 KN	231,21 KN	302,50 KN
40/70/83,15	210,44 KN	289,41 KN	378,64 KN

Fuente: Propia.

Además, para este caso, al tratarse de una placa de concreto reforzado se debe revisar la deformación de momento máximo resultante, como se muestra en la tabla 26 que sigue.

Tabla 26 Cargas momento máximo crítico en compresión (tubo superior) obtenidas mediante el software SAP 2000 correspondientes a la propuesta para la aplicación de cargas en el soporte de techo del caso 3.

Propuesta de cargas C.T. / C.P. / C.V. kg/m ² / kg/m ² / kg/m ²	Longitud de soporte de techo 12 m	Longitud de soporte de techo 14 m	Longitud de soporte de techo 16 m
40/30/83,15	53398,47 Kg - cm	53558,15 Kg - cm	61725,91 Kg - cm
40/40/83,15	58288,87 Kg - cm	58463,17 Kg - cm	67378,96 Kg - cm
40/70/83,15	72960,06 Kg - cm	73178,24 Kg - cm	84338,10 Kg - cm

Fuente: Propia.

Paso 3: Propuesta diseño geométrico.

Revisión del diseño geométrico respecto a las cargas críticas, tanto compresión como tensión del sistema de soporte de techo, con las especificaciones de tubos laminados en frío y en caliente, además de conceptos básicos para el diseño de losa reforzada, como se describe en la tabla 27 que sigue.

Tabla 27. Diseño de acero en tensión para el caso 3.

Diseño en tensión (Tubo inferior)						
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud de soporte de techo (m)	Carga axial demanda crítica (en tensión) (KN)	Sección propuesta (mm)	$\phi_c P_n$ Propuesta sección nueva (KN)	Resultado sección geométrica demanda crítica \leq $\phi_c P_n$	% demanda
40 / 30 / 83,15	12	77,04	72 x 72 x 1,50	84,38	CUMPLE	91%
	14	105,93	91 x 91 x 1,50	108,89	CUMPLE	97%
	16	138,58	100 x 100 x 1,80	141,6	CUMPLE	98%
40 / 40 / 83,15	12	84,09	72 x 72 x 1,50	84,38	CUMPLE	100%
	14	115,63	100 x 100 x 1,50	118,76	CUMPLE	97%
	16	151,28	72 x 72 x 3,17	169,49	CUMPLE	89%
40 / 70 / 83,15	12	105,26	91 x 91 x 1,50	108,89	CUMPLE	97%
	14	144,74	100 x 100 x 1,80	141,6	ACEPTABLE	102%
	16	189,35	100 x 100 x 2,37	184,89	ACEPTABLE	102%

Fuente: Propia.

Paso 4: Diseño estructural final.

Se define el diseño final de acero para toda la sección longitudinal en tensión, y se procede a optimizar el sistema de ser posible, como se muestra en la tabla 28 que sigue.

Tabla 28 Diseño optimizado de acero en tensión para el caso 3.

Diseño en tensión (Tubo inferior)									
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta (mm)	Longitud de sección al centro (m)	Longitud de sección a los extremos reducida (m)	Pcrítico en reducción (KN)	Sección propuesta (mm)	ϕ As Fy Propuesta sección reducida (KN)	Resultado sección geométrica $P_{cr} \leq \phi As F_y$	% de aceptación
40 / 30 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	6	3	62,6	72 x 72 x 1,20	68,24	CUMPLE	92%
	14	91 x 91 x 1,50	14	0	-	-	-	CUMPLE	
	16	100 x 100 x 1,80	8	4	115,38	100 x 100 x 1,50	118,76	CUMPLE	97%
40 / 40 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	6	3	68,33	72 x 72 x 1,20	68,24	NO CUMPLE	100%
	14	100 x 100 x 1,50	14	0	-	-	-	CUMPLE	
	16	72 x 72 x 3,17			125,95	72 x 72 x 2,37	131,61	ACEPTABLE	96%
40 / 70 / 83,15	12	91 x 91 x 1,50	12	0	-	-	-	CUMPLE	
	14	100 x 100 x 1,80	8	3	107,49	100 x 100 x 1,50	118,76	CUMPLE	91%
	16	100 x 100 x 2,37	12	2	88,75	100 x 100 x 1,80	91,71	CUMPLE	97%

Fuente: Propia.

Paso 5: Diseño losa reforzada.

- i. Revisión de la separación mínima entre barras paralelas en una capa de refuerzo:

db propuesto (cm) = 0,96 (diámetro nominal barra de acero # 3).

distancia propuesta entre barras de acero (cm) = 15 (separación de barras en ambos lados @ 15 cm).

$$\text{distancia propuesta entre barras de acero} \geq db \quad (\text{Ec. 45})$$

$$15,00 \text{ cm} \geq 0,96 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 46})$$

$$\therefore \text{cumple} \quad (\text{Ec. 47})$$

$$\text{distancia propuesta entre barras de acero} \geq 2,5 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 48})$$

$$15,00 \text{ cm} \geq 2,5 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 49})$$

$$\therefore \text{cumple} \quad (\text{Ec. 50})$$

Por tanto, se propone barras de acero con diámetro 0,96 cm (varilla # 3) @ 15 cm.

- ii. Revisión de refuerzo por retracción y temperatura - separación máxima refuerzo por retracción y temperatura:

Espesor propuesto de losa (cm) = 6

Separación entre barras de acero propuesto (cm) = 15

$$4h \geq x ; 35,00 \text{ cm} \geq x \quad (\text{Ec. 51})$$

$$24,00 \text{ cm} \geq 15,00 \text{ cm}; 35,00 \text{ cm} \geq 15,00 \text{ cm}; \quad (\text{Ec. 52})$$

$$\therefore \text{cumple.} \quad (\text{Ec. 53})$$

- iii. Acero mínimo requerido refuerzo por retracción y temperatura:

$$A_s \text{ mínimo} = 0,002 * b * h$$

$$b \text{ (cm)} = 30,00$$

$$h \text{ (cm)} = 6,00$$

$$A_s \text{ mínimo (cm}^2\text{)} = 0,36$$

As propuesto (cm^2) = 2,13 (correspondiente a 3 varillas longitudinales # 3)

$$As \text{ propuesto} \geq As \text{ mínimo} \quad (\text{Ec. 54})$$

$$2,13 \text{ cm}^2 \geq 0,36 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec. 55})$$

$$\therefore \text{cumple.} \quad (\text{Ec. 56})$$

iv. Separación máxima refuerzo a flexión:

Espesor propuesto de losa (cm) = 6

Separación entre barras de acero propuesto (cm) = 15

$$3h \geq x ; 30,00 \text{ cm} \geq x \quad (\text{Ec. 57})$$

$$18,00 \text{ cm} \geq 15,00 \text{ cm}; 30,00 \text{ cm} \geq 15,00 \text{ cm} \quad (\text{Ec. 58})$$

$$\therefore \text{cumple.} \quad (\text{Ec. 59})$$

viii. Acero mínimo de refuerzo a tensión por flexión.

$$As \text{ mínimo} = 0,002 * b * h$$

$$b \text{ (cm)} = 30,00$$

$$h \text{ (cm)} = 6,00$$

$$As \text{ mínimo (cm}^2\text{)} = 0,36$$

As propuesto (cm^2) = 2,13 (correspondiente a 3 varillas longitudinales # 3)

$$A_{st} \geq \rho_t * b * h \quad (\text{Ec. 60})$$

$$2,13 \text{ cm}^2 \geq 0,36 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec. 61})$$

$$\therefore \text{cumple.} \quad (\text{Ec. 62})$$

v. Acero máximo de refuerzo a tensión por flexión.

$$As \text{ máximo} = \rho_{\text{max}} * b * h$$

$$b \text{ (cm)} = 30,00$$

$$h \text{ (cm)} = 6,00$$

$$\rho_{\text{max}} = 0,0106$$

$$As \text{ máximo (cm}^2\text{)} = 1,908$$

As propuesto (cm^2) = 2,13 (correspondiente a 3 varillas longitudinales # 3)

$$As_{\text{máximo}} \geq As_{\text{propuesto}} \quad (\text{Ec. 63})$$

$$1,908 \text{ cm}^2 < 2,13 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec. 64})$$

vi. Resistencia aproximada de diseño a flexión.

As propuesto (cm^2) = 2,13 (correspondiente a 3 varillas longitudinales # 3)

$$F_y (\text{KN-cm}^2) = 2,0594$$

$$b (\text{cm}) = 30,00$$

$$d (\text{cm}) = 3,00$$

$$\phi = 0,90$$

$$\Phi Mn = \phi * 0,85 * As * F_y * d \quad (\text{Ec. 65})$$

$$\Phi Mn = 0,90 * 0,85 * 2,13 * 2,0594 * 3,0 \quad (\text{Ec. 66})$$

$$\Phi Mn = 10,07 \text{ KN} - \text{cm}. \quad (\text{Ec. 67})$$

vii. Obtención de la cuantía de refuerzo a flexión.

As propuesto (cm^2) = 2,13 (correspondiente a 3 varillas longitudinales # 3)

$$F_y (\text{kg-cm}^2) = 4200$$

$$b (\text{cm}) = 30,00$$

$$d (\text{cm}) = 3,00$$

$$\phi = 0,90$$

$$h (\text{cm}) = 6,00$$

Mu (kg-cm): de acuerdo con tabla 30 anteriormente mencionada.

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{b * h} \geq \frac{Mu}{\phi * 0,85 * As * F_y * d^2}$$

Se debe incrementar el acero propuesto en caso de que la ecuación anterior no cumpla, tal como se muestra en la tabla 29 que sigue se aumenta el acero en cada uno de los casos hasta que la comprobación sea positiva.

Tabla 29 Obtención de la cuantía de refuerzo a flexión.

Obtención de la cuantía de refuerzo a flexión.										
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud de soporte de techo (m)	Momento máximo obtenido (kg -cm)	Acero propuesto (3 varillas longitudinales #3) (cm ³)	ρ_t (Acero propuesto)	$\frac{M_u}{\phi * 0.85 * A_s * F_y * d^2}$	Resultado acero propuesto	Combinación acero en incremento	Acero requerido en incremento (cm ³)	ρ_t (Aumento de acero)	Resultado incremento acero
40 / 30 / 83,15	12	53398,47	2,13	0,0237	0,0616	No cumple	3 # 5	6	0,0667	Cumple
	14	53558,15	2,13	0,0237	0,0617	No cumple	3 # 5	6	0,0667	Cumple
	16	61725,91	2,13	0,0237	0,0712	No cumple	3 # 6	8,52	0,0947	Cumple
40 / 40 / 83,15	12	58288,87	2,13	0,0237	0,0672	No cumple	3 # 6	8,52	0,0947	Cumple
	14	58463,17	2,13	0,0237	0,0674	No cumple	3 # 6	8,52	0,0947	Cumple
	16	67378,96	2,13	0,0237	0,0777	No cumple	3 # 6	8,52	0,0947	Cumple
40 / 70 / 83,15	12	72960,06	2,13	0,0237	0,0841	No cumple	3 # 6	8,52	0,0947	Cumple
	14	73178,24	2,13	0,0237	0,0844	No cumple	3 # 6	8,52	0,0947	Cumple
	16	84338,10	2,13	0,0237	0,0972	No cumple	3 # 7	11,61	0,1290	Cumple

Fuente: Propia.

Por lo anterior, se resume que las dimensiones y acero requerido para cada una de las propuestas dadas consiste en lo establecido de acuerdo con la tabla 30 que sigue.

Tabla 30 Resumen diseño de losa reforzada

Resumen diseño de losa reforzada							
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Ancho de losa (m)	Espesor de losa (m)	Volumen de Concreto en losa (m ³)	Especificación de acero requerido	Área de acero requerido (m ²)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)
40 / 30 / 83,15	12	0,30	0,06	0,21	3 # 5	0,0006	518,40
	14	0,30	0,06	0,25	3 # 5	0,0006	604,80
	16	0,30	0,06	0,28	3 # 6	0,0852	691,20
40 / 40 / 83,15	12	0,30	0,06	0,21	3 # 6	0,0852	518,40
	14	0,30	0,06	0,25	3 # 6	0,0852	604,80
	16	0,30	0,06	0,28	3 # 6	0,0852	691,20
40 / 70 / 83,15	12	0,30	0,06	0,21	3 # 6	0,0852	518,40
	14	0,30	0,06	0,25	3 # 6	0,0852	604,80
	16	0,30	0,06	0,28	3 # 7	0,1161	691,20

Fuente: Propia.

4.2 Análisis de resultados: comparativo de desempeño estructural para cada una de las propuestas alternativas de sistemas de largueros para naves industriales de concreto prefabricado.

De acuerdo con los datos recopilados en este documento, se pueden resumir los datos más relevantes referentes al diseño en la demanda de carga, tanto tensión como compresión para cada propuesta alternativa planteada, de esta manera, es posible determinar cuál de los casos en estudio tiene mejor desempeño estructural según sus condiciones.

Según se muestra para el caso uno, en las tablas 31 y 32, referentes a la demanda tanto en tensión como en compresión se incrementan las demandas conforme aumentan la longitud del larguero y las cargas recibidas, así se demuestra en las figuras 42 y 43, donde mediante un diagrama se observa la tendencia a subir para cada uno de los casos, siendo el larguero de diez y seis metros de longitud con combinación de cargas C.T.= 40 kg/m², C.P.= 70 kg/m² y C.V.= 83,15 kg/m² el que mayor demanda representa en tensión y compresión.

Por otra parte, para el caso dos, de acuerdo con la recopilación de datos de las tablas 33 y 34 y las figuras 44 y 45 se puede observar la tendencia en la demanda tanto en compresión y como en tensión, la cual es similar al caso uno, esta va hacia arriba conforme se aumenta la longitud del elemento y la carga aplicada. El resultado para el caso tres es el más bajo para carga demandante, esto porque es el caso con sección de mayor peso al implementar una placa de concreto reforzado en su geometría aumentando hasta tres veces el peso propio del elemento. Además, como es de esperar para los tres casos el dato más elevado es la demanda generada al cargar el elemento con combinación de carga permanente en 70 kg/m². Es importante recalcar que el peso del elemento influye significativamente para la demanda de carga, ya que por la estructura geométrica planteada para el caso dos este lleva más cantidad de tubo cuadrado estructural lo que explicaría por qué es un poco más elevado que el caso uno.

Asimismo ocurre con el caso tres, tal como se observan los datos recopilados en las tablas 35 y 36 y en las figuras 46 y 47, donde al igual que el caso uno y dos, el elemento con combinaciones de carga mayor consigue una demanda más alta, contrario a lo que ocurre con el elemento con cargas menores correspondiente a C.T.= 40 kg/m², C.P.= 30 kg/m² y C.V.= 83,15 kg/m².

Tabla 31. Demanda de carga en tensión para el caso 1.

Demanda de carga en tensión (inferior) para el caso 1			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
CT =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	83,89 Kg/m ²	114,86 Kg/m ²	150,59 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	91,58 Kg/m ²	125,38 Kg/m ²	164,38 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	114,63 Kg/m ²	156,94 Kg/m ²	205,76 Kg/m ²

Fuente: Propia.

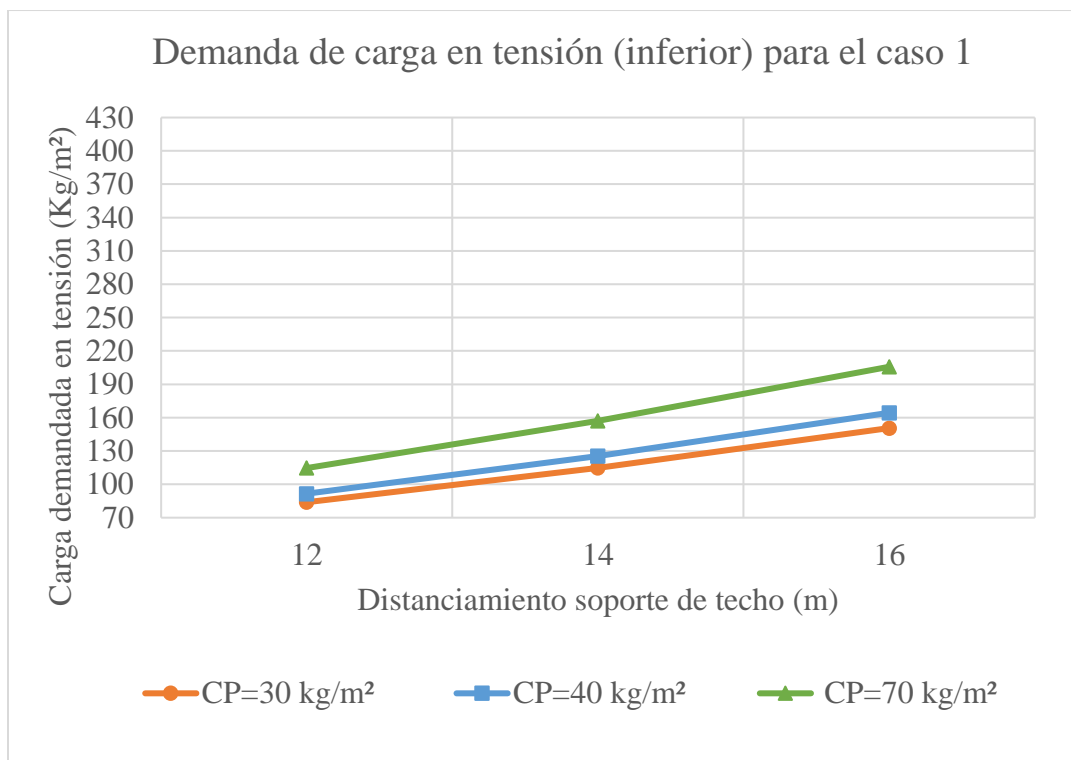


Fig. 42. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 1.
Fuente: Propia.

Tabla 32. Demanda de carga en compresión para el caso 1.

Demanda de carga en compresión (superior) para el caso 1			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	167,79 Kg/m ²	229,72 Kg/m ²	301,19 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	183,16 Kg/m ²	250,76 Kg/m ²	328,77 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	229,26 Kg/m ²	313,88 Kg/m ²	411,52 Kg/m ²

Fuente: Propia.

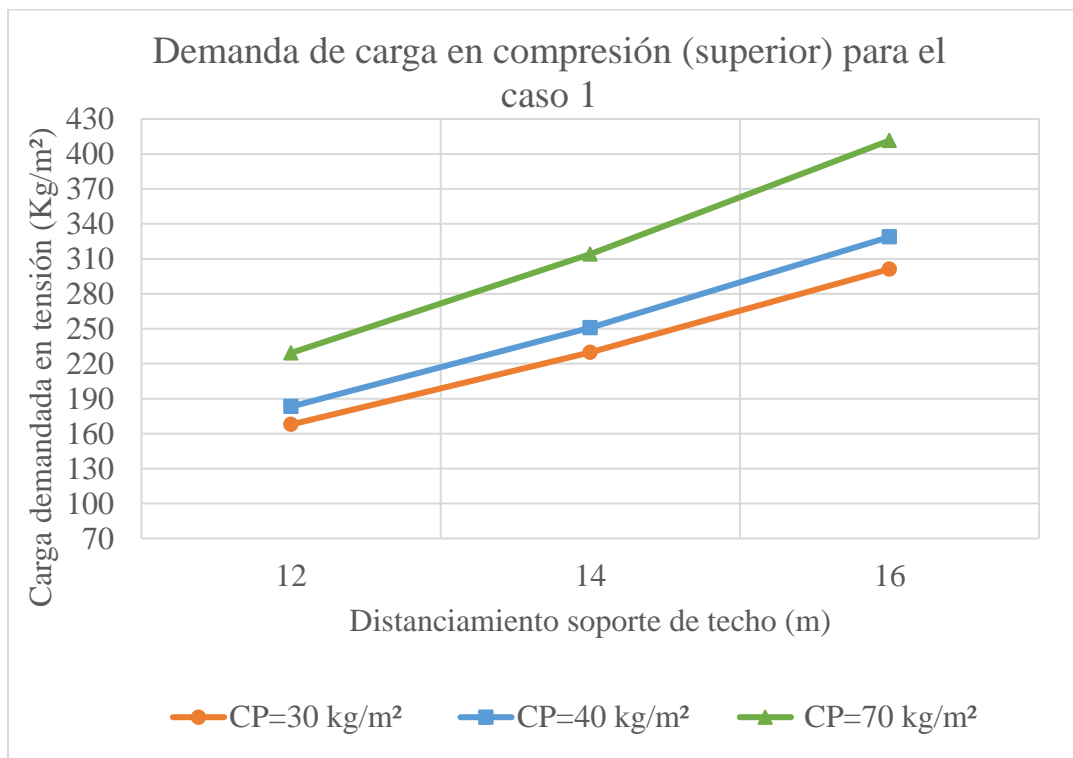


Fig. 43. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 1.

Fuente: Propia.

Tabla 33. Demanda de carga en tensión para el caso 2.

Demanda de carga en tensión (inferior) para el caso 2			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	84,98 Kg/m ²	115,76 Kg/m ²	151,27 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	92,76 Kg/m ²	126,36 Kg/m ²	165,13 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	116,11 Kg/m ²	158,17 Kg/m ²	206,69 Kg/m ²

Fuente: Propia.

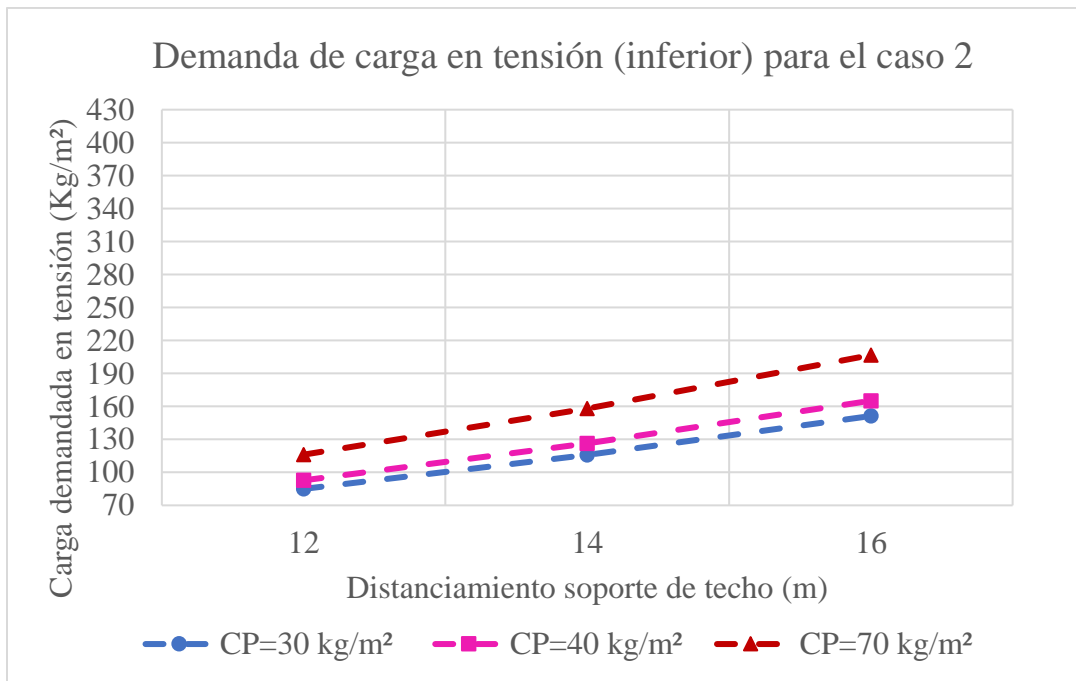


Fig. 44. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 2.

Fuente: Propia.

Tabla 34. Demanda de carga en compresión para el caso 2.

Demanda de carga en compresión (superior) para el caso 2			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	170,73 Kg/m ²	232,55 Kg/m ²	303,87 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	186,36 Kg/m ²	253,84 Kg/m ²	331,70 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	233,27 Kg/m ²	317,74 Kg/m ²	415,19 Kg/m ²

Fuente: Propia

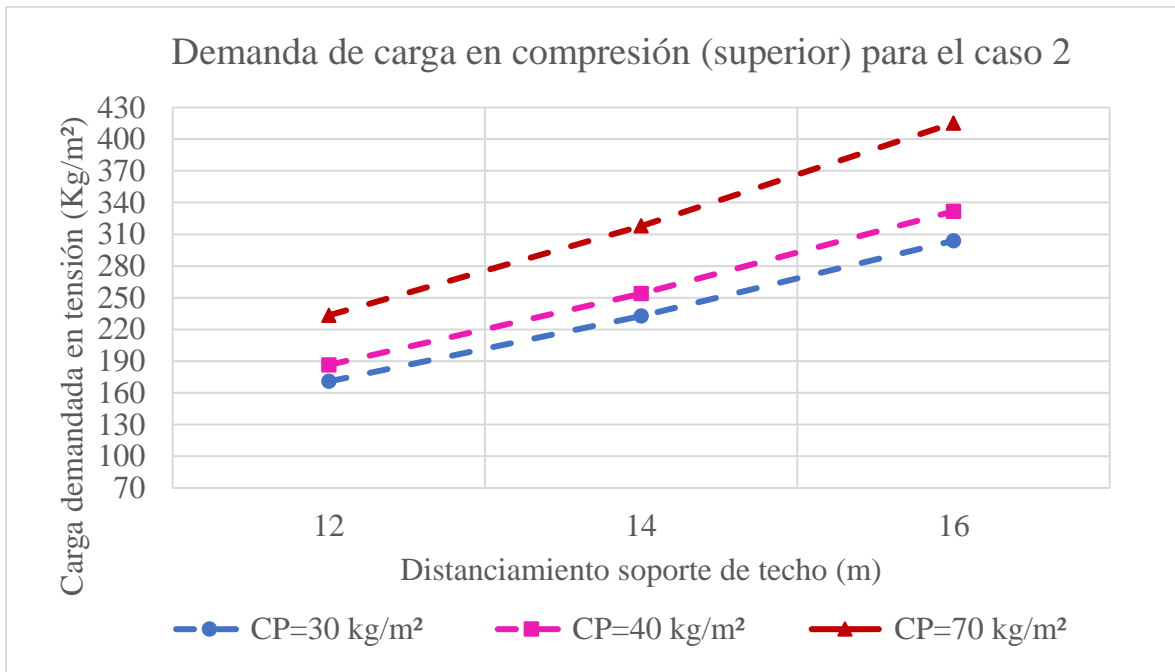


Fig. 45. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 2.

Fuente: Propia.

Tabla 35. Demanda de carga en tensión para el caso 3.

Demanda de carga en tensión (inferior) para el caso 3			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	77,04 Kg/m ²	105,93 Kg/m ²	138,58 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	84,09 Kg/m ²	115,63 Kg/m ²	151,28 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	105,26 Kg/m ²	144,74 Kg/m ²	189,35 Kg/m ²

Fuente: Propia.

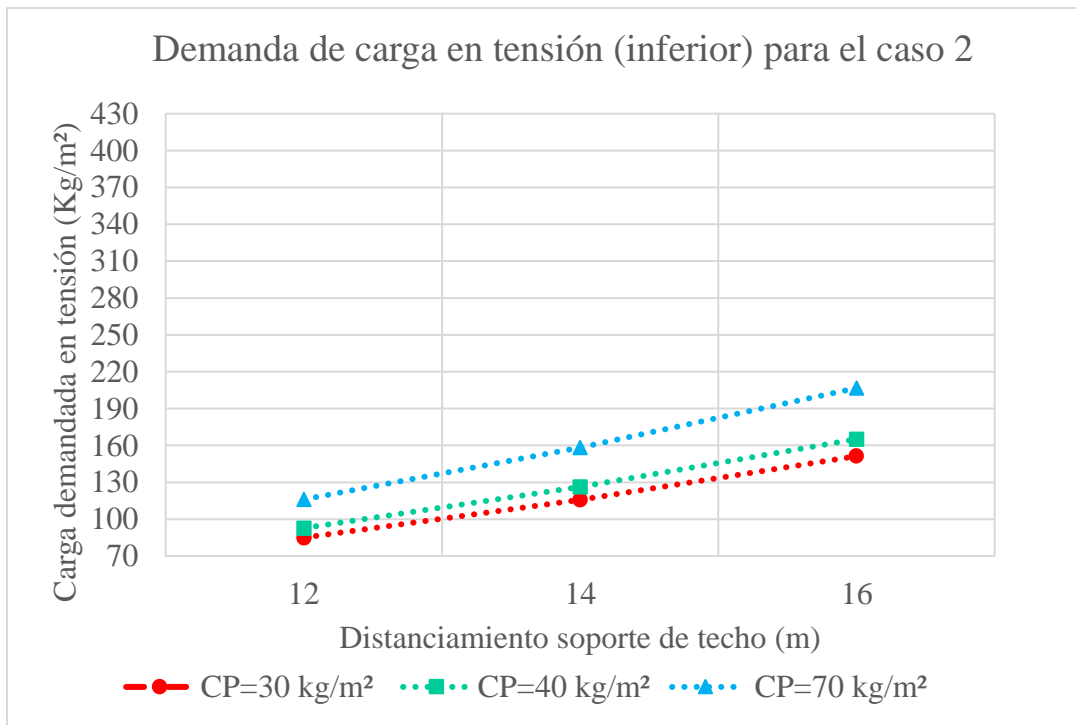


Fig. 46. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 3.

Fuente: Propia.

Tabla 36. Demanda de carga en compresión para el caso 3.

Demanda de carga en compresión (superior) para el caso 3			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	154,02 Kg/m ²	211,81 Kg/m ²	277,12 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	168,12 Kg/m ²	231,21 Kg/m ²	302,50 Kg/m ²
C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	210,44 Kg/m ²	289,41 Kg/m ²	378,64 Kg/m ²

Fuente: Propia.

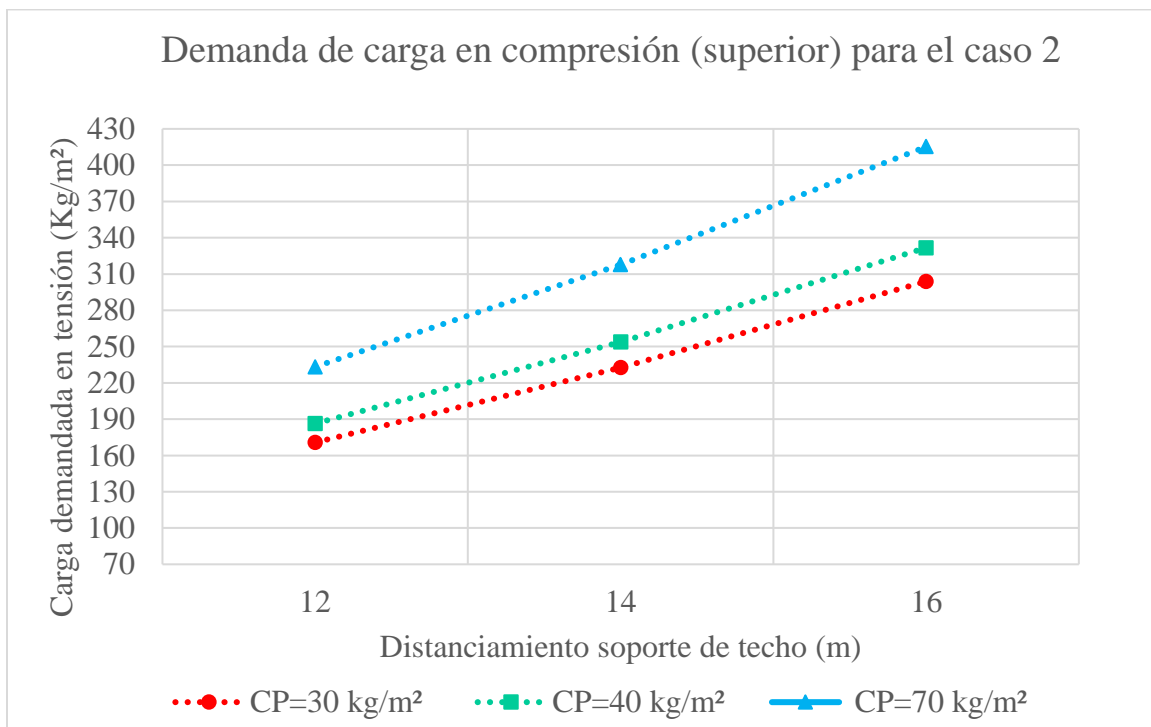


Fig. 47. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para el caso 3.

Fuente: Propia.

Tabla 37. Demandas de cargas obtenidas en tensión para los casos 1, 2 y 3.

Demanda de carga en tensión (inferior) para los casos 1-2-3			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
Caso 1 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	83,89 Kg/m ²	114,86 Kg/m ²	150,59 Kg/m ²
Caso 1 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	91,58 Kg/m ²	125,38 Kg/m ²	164,38 Kg/m ²
Caso 1 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	114,63 Kg/m ²	156,94 Kg/m ²	205,76 Kg/m ²
Caso 2 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	84,98 Kg/m ²	115,76 Kg/m ²	151,27 Kg/m ²
Caso 2 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	92,76 Kg/m ²	126,36 Kg/m ²	165,13 Kg/m ²
Caso 2 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	116,11 Kg/m ²	158,17 Kg/m ²	206,69 Kg/m ²
Caso 3 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	77,04 Kg/m ²	105,93 Kg/m ²	138,58 Kg/m ²
Caso 3 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	84,09 Kg/m ²	115,63 Kg/m ²	151,28 Kg/m ²
Caso 3 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	105,26 Kg/m ²	144,74 Kg/m ²	189,35 Kg/m ²

Fuente: Propia.

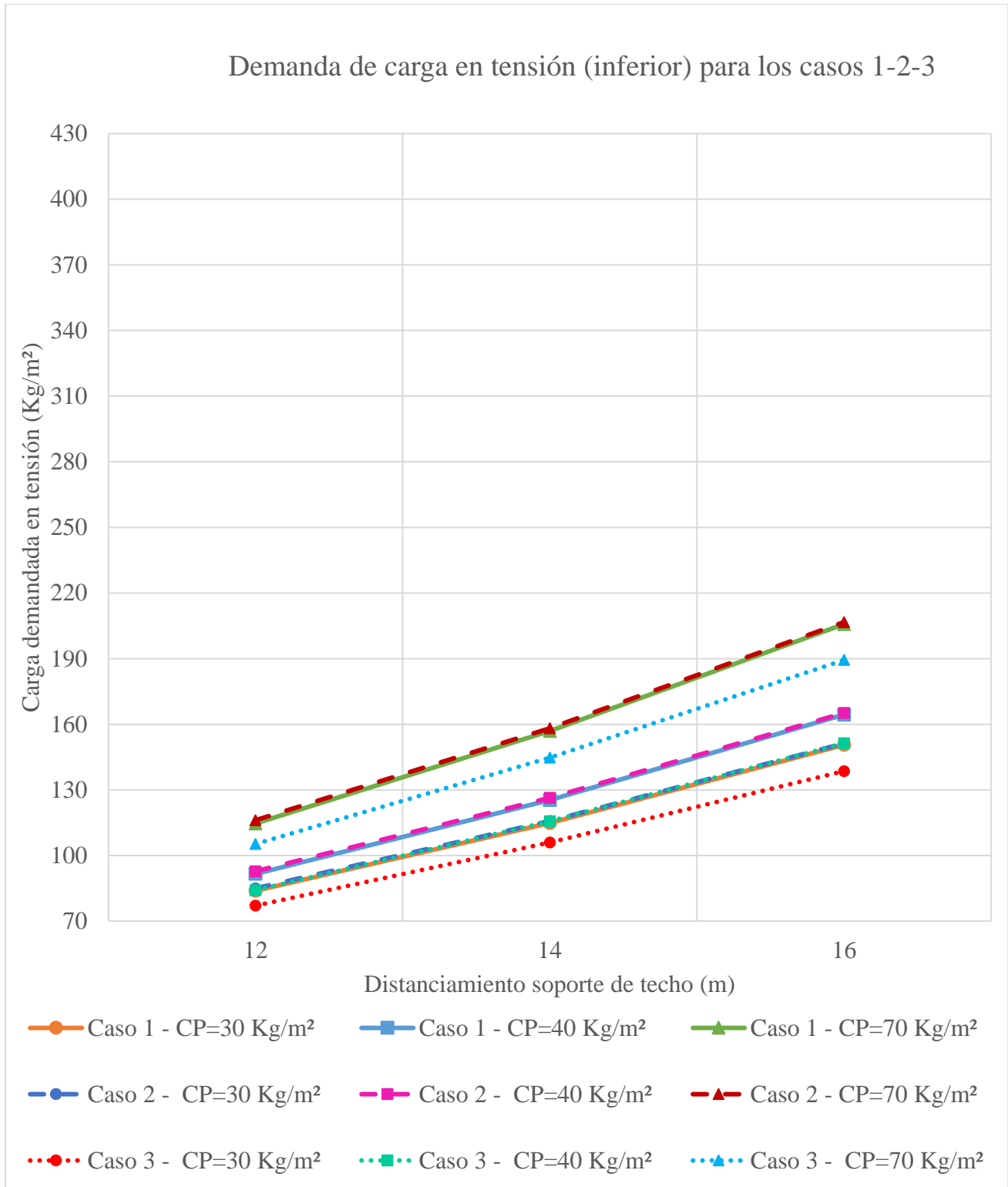


Fig. 48. Relación de carga demandada en tensión en función del distanciamiento de soporte de techo para los casos 1, 2 y 3.

Fuente: Propia.

Tabla 38. Demandas de cargas obtenidas en compresión para los casos 1, 2 y 3.

Demanda de carga en compresión (superior) para los casos 1-2-3			
Longitud total de soporte de techo	12 m	14 m	16 m
Caso 1 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	167,79 Kg/m ²	229,72 Kg/m ²	301,19 Kg/m ²
Caso 1 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	183,16 Kg/m ²	250,76 Kg/m ²	328,77 Kg/m ²
Caso 1 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	229,26 Kg/m ²	313,88 Kg/m ²	411,52 Kg/m ²
Caso 2 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	170,73 Kg/m ²	232,55 Kg/m ²	303,87 Kg/m ²
Caso 2 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	186,36 Kg/m ²	253,84 Kg/m ²	331,70 Kg/m ²
Caso 2 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	233,27 Kg/m ²	317,74 Kg/m ²	415,19 Kg/m ²
Caso 3 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	154,02 Kg/m ²	211,81 Kg/m ²	277,12 Kg/m ²
Caso 3 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	168,12 Kg/m ²	231,21 Kg/m ²	302,50 Kg/m ²
Caso 3 - C.T. =40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² / C.V.=83,15 kg/m ²	210,44 Kg/m ²	289,41 Kg/m ²	378,64 Kg/m ²

Fuente: Propia.

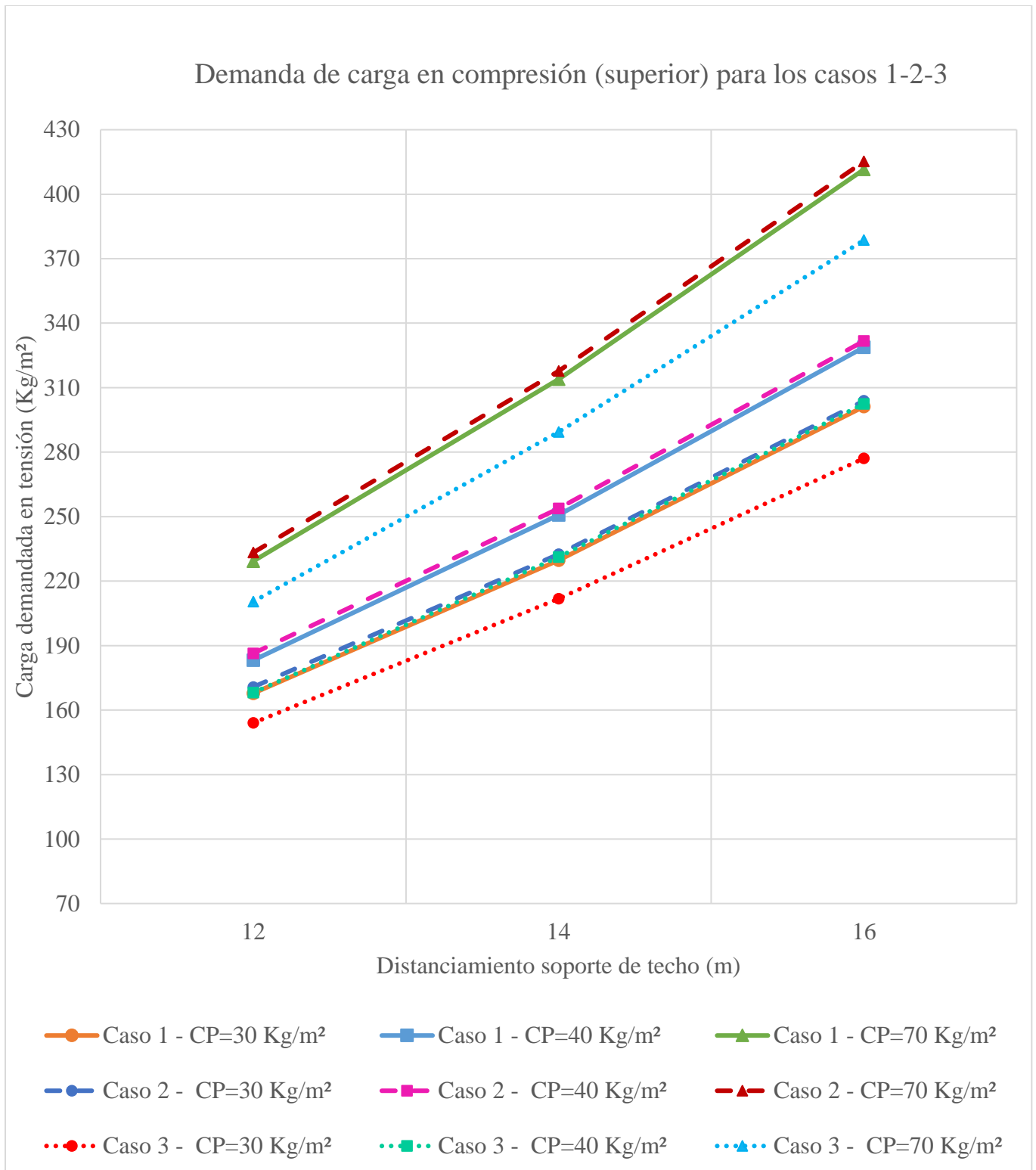


Fig. 49. Relación de carga demandada en compresión en función del distanciamiento de soporte de techo para los casos 1, 2 y 3.

Fuente: Propia.

Se obtiene la recopilación de datos en cuanto a las demandas resultantes, tanto en tensión como compresión de las tablas y gráficos anteriormente mencionados y para cada uno de los tres casos analizados, tal como se muestra en las tablas 37 y 38. Se alcanza a visualizar en forma gráfica cuál de las propuestas genera mayores y menores demandas unificando los resultados extraídos como se denota en las figuras 48 y 49.

Del gráfico figura 48 anteriormente mostrado, es posible afirmar que las cargas en tensión generadas para el caso tres son inferiores en comparación con los casos 1 y 2; esto puede ser el resultado de uso de materiales constructivos diferentes, debido a que las propuestas de diseño para el caso uno y dos son totalmente en acero; sin embargo, para el caso tres se contempla la mezcla de acero y concreto reforzado en el diseño. Cabe recalcar que en los casos uno y dos, las diferencias en cuanto a cargas en tensión generadas según las diferentes propuestas de cargas son pocos significativas.

De acuerdo con los gráficos anteriores en las figuras 48 y 49, se muestra que el caso dos para la tercera propuesta de carga, tanto en compresión como tensión, se dan las mayores demandas de cargas. También, aparece que la menor demanda tanto en tensión, como en compresión se da para el caso tres en la propuesta de carga uno.

Además, se puede concluir que, para todos los casos, las demandas en compresión y tensión se dan en forma ascendente conforme aumenta la longitud de sección de larguero, ya que, a mayor distanciamiento entre apoyos, mayor será la carga que debe ser soportada por el elemento estructural.

Mediante la recopilación de datos que se observa en las tablas 37 y 38, referentes a la demanda de carga en tensión y compresión para cada uno de los tres casos analizados y con los gráficos de las figuras 48 y 49 correspondientes a las tablas respectivamente, es posible identificar el sistema constructivo mayormente factible de acuerdo con las necesidades del cliente, variando las cargas y la luces entre marcos estructurales de acuerdo con las necesidades requeridas. El caso 3 corresponde al de mayor factibilidad estructural.

4.3 Análisis de resultados: comparativo de costos económicos para cada una de las propuestas estructuralmente factibles de sistemas de largueros para naves industriales de concreto prefabricado.

De acuerdo con los diseños y análisis estructurales realizados para cada uno de los tres casos propuestos que se muestran, y tomando en cuenta que los tres son estructuralmente

factibles, se realiza para cada propuesta alternativa el estudio económico con base en costos establecidos en el mercado nacional para insumos en el sector construcción.

Con el fin de disminuir los costos y el peso del elemento, se realiza una optimización de la sección con el material, disminuyendo los espesores en los extremos donde las opciones del mercado lo permitan, esto porque es en los extremos donde se genera menor carga axial aplicada y se necesita menor refuerzo. La optimización se logra efectuar para todos los casos, aunque en unos es mayor que otros; sin embargo, para todos los casos es positiva.

Es importante recalcar que en el caso de los elementos de acero se establece un costo de \$4,00 por kilogramo que incluye: pintura, corte, soldadura y demás costos que convenga. Dicho costo basado en experiencia de la empresa Productos de Concreto S.A. en uso acero para soporte de techo; mientras que en el caso del concreto reforzado, los costos fueron tomados de un presupuesto detallado por caso tomando en cuenta las condiciones de diseño, encofrado, acero de amarre, acero de refuerzo, mezcla de concreto y mano de obra.

Se detalla para el caso uno, las tablas 39, 40 y 41 correspondientes a costos relacionados sin optimizar de la propuesta estructural de este caso. Además del resumen de costos sin optimizar para el caso uno, que se detalla en la tabla 42.

También se puede observar para el caso dos, la recopilación de los principales datos en las tablas 43, 44 y 45 correspondientes a costos sin optimizar en la propuesta de este caso. Asimismo, el resumen de costos sin optimizar para el caso dos que se muestra en la tabla 46.

Finalmente se muestran los costos sin optimizar para el caso tres en las tablas 47, 48 y 49 y el resumen del caso en la tabla 50.

Tabla 39. Costos sin optimizar relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 1.

Revisión en compresión (Tubo superior)								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	14,40	172,76	14,40	4,00	691,04	57,59
	14	100 x 100 x 4,75	14,40	201,55	14,40	4,00	806,21	57,59
	16	100 x 100 x 6,35	18,17	290,72	18,17	4,00	1162,88	72,68
40 / 40 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	14,40	172,76	14,40	4,00	691,04	57,59
	14	100 x 100 x 6,35	18,17	254,38	18,17	4,00	1017,52	72,68
	16	100 x 100 x 6,35	18,17	290,72	18,17	4,00	1162,88	72,68
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	14,40	172,76	14,40	4,00	691,04	57,59
	14	100 x 100 x 6,35	18,17	254,38	18,17	4,00	1017,52	72,68
	16	100 x 100 x 7,94	22,07	353,12	22,07	4,00	1412,48	88,28

Fuente: Propia.

Tabla 40. Costos sin optimizar relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso I.

Revisión en tensión (Tubo inferior)								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	3,31	39,73	3,31	4,00	158,91	13,24
	14	100 x 100 x 1,50	4,57	63,98	4,57	4,00	255,90	18,28
	16	72 x 72 x 3,17	6,97	111,55	6,97	4,00	446,20	27,89
40 / 40 / 83,15	12	72 x 72 x 1,80	3,97	47,67	3,97	4,00	190,70	15,89
	14	72 x 72 x 2,37	5,23	73,23	5,23	4,00	292,93	20,92
	16	72 x 72 x 3,17	6,97	111,52	6,97	4,00	446,08	27,88
	12	100 x 100 x 1,50	4,57	54,84	4,57	4,00	219,36	18,28
40 / 70 / 83,15	14	72 x 72 x 3,17	6,97	97,58	6,97	4,00	390,32	27,88
	16	100 x 100 x 3,17	9,66	154,51	9,66	4,00	618,06	38,63

Fuente: Propia.

Tabla 41. Costos sin optimizar relacionados con los tubos de amarre del caso 1.

Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud total de tubo de amarre (m)	Número de amarres	Tubos de amarre						
				Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso total de los tubos de amarre (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	1,20	12	72 x 72 x 1,50	3,31	47,67	3,97	4,00	190,69	15,89
	14	1,20	14	100 x 100 x 1,50	4,57	76,77	5,48	4,00	307,08	21,93
	16	1,20	16	72 x 72 x 3,17	6,97	133,86	8,37	4,00	535,44	33,46
40 / 40 / 83,15	12	1,20	12	72 x 72 x 1,80	3,97	57,21	4,77	4,00	228,84	19,07
	14	1,20	14	72 x 72 x 2,37	5,23	87,88	6,28	4,00	351,51	25,11
	16	1,20	16	72 x 72 x 3,17	6,97	133,82	8,36	4,00	535,30	33,46
40 / 70 / 83,15	12	1,20	12	100 x 100 x 1,50	4,57	65,81	5,48	4,00	263,23	21,94
	14	1,20	14	72 x 72 x 3,17	6,97	117,10	8,36	4,00	468,38	33,46
	16	1,20	16	100 x 100 x 3,17	9,66	185,42	11,59	4,00	741,67	46,35

Fuente: Propia.

Tabla 42. Resumen de costos sin optimizar del caso 1.

Resumen caso 1								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Costo tubo superior (\$)	Costo tubos inferiores (2 unidades) (\$)	Costo tubos de amarre (\$)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo total de la propuesta (\$)	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	691,04	317,82	190,69	260,16	21,68	1199,56	99,96
	14	806,21	511,80	307,08	342,30	24,45	1625,10	116,08
	16	1162,88	892,39	535,44	536,13	33,51	2590,71	161,92
40 / 40 / 83,15	12	691,04	381,39	228,84	277,64	23,14	1301,27	108,44
	14	1017,52	585,85	351,51	415,49	29,68	1954,89	139,63
	16	1162,88	892,16	535,30	536,06	33,50	2590,34	161,90
40 / 70 / 83,15	12	691,04	438,72	263,23	293,41	24,45	1392,99	116,08
	14	1017,52	780,64	468,38	469,06	33,50	2266,54	161,90
	16	1412,48	1236,12	741,67	693,05	43,32	3390,27	211,89

Fuente: Propia.

De acuerdo con el resumen de costos sin optimizar para el caso uno, se afirma que el costo en cada propuesta de carga se incrementa debido a la longitud del soporte de techo. Asimismo, los valores crecen conforme al aumento de la propuesta de carga, siendo esta correspondiente a carga temporal de 40 kg/m², carga permanente de 70 kg/m² y carga de viento de 83,15 kg/m² la de mayor costo económico para el caso uno y la de menor costo económico sería la propuesta de carga correspondiente a la carga temporal de 40 kg/m², carga permanente de 30 kg/m² y carga de viento de 83,15 kg/m² y doce metros de longitud para soporte de techo.

Por otro lado, otro de los aspectos importantes de recalcar en el resumen de la tabla 51 es el peso de los elementos, el cual es un tema importante para el diseño final de naves industriales. El peso de los elementos va desde los 21,68 kg por metro lineal hasta 43,32 kg por metro lineal en el caso del elemento más largo y con combinación de cargas mayores, y en consecuencia, el producto promedio de peso por metro lineal para el caso uno es de 29,69 kg.

Tabla 43. Costos sin optimizar relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 2.

Revisión en compresión (Tubo superior)								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	14,40	172,80	14,40	4,00	691,20	57,60
	14	100 x 100 x 4,75	14,40	201,60	14,40	4,00	806,40	57,60
	16	100 x 100 x 4,75	14,40	230,40	14,40	4,00	921,60	57,60
40 / 40 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	14,40	172,80	14,40	4,00	691,20	57,60
	14	100 x 100 x 6,35	18,17	254,38	18,17	4,00	1017,52	72,68
	16	100 x 100 x 6,35	18,17	290,72	18,17	4,00	1162,88	72,68
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 4,75	14,40	172,80	14,40	4,00	691,20	57,60
	14	100 x 100 x 6,35	18,17	254,38	18,17	4,00	1017,52	72,68
	16	100 x 100 x 7,94	22,07	353,12	22,07	4,00	1412,48	88,28

Fuente: Propia.

Tabla 44. Costos sin optimizar relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 2.

Revisión en tensión (Tubo inferior)								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	3,31	39,73	3,31	4,00	158,91	13,24
	14	100 x 100 x 1,50	4,57	63,98	4,57	4,00	255,90	18,28
	16	72 x 72 x 3,17	6,97	111,55	6,97	4,00	446,20	27,89
40 / 40 / 83,15	12	72 x 72 x 1,80	3,97	47,67	3,97	4,00	190,70	15,89
	14	91 x 91 x 1,80	4,97	69,52	4,97	4,00	278,10	19,86
	16	72 x 72 x 3,17	6,97	111,55	6,97	4,00	446,20	27,89
40 / 70 / 83,15	12	100 x 100 x 1,50	4,57	54,84	4,57	4,00	219,34	18,28
	14	72 x 72 x 3,17	6,97	97,61	6,97	4,00	390,42	27,89
	16	100 x 100 x 3,17	9,66	154,51	9,66	4,00	618,06	38,63

Fuente: Propia.

Tabla 45. Costos sin optimizar relacionados con los tubos de amarre del caso 2.

Tubos de amarre										
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud total de tubo de amarre (m)	Número de amarres	Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso total de los tubos de amarre (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	2,96	12	72 x 72 x 1,50	3,31	117,64	9,80	4,00	470,57	39,21
	14	2,96	14	100 x 100 x 1,50	4,57	189,44	13,53	4,00	757,78	54,13
	16	2,96	16	72 x 72 x 3,17	6,97	330,32	20,64	4,00	1321,28	82,58
40 / 40 / 83,15	12	2,96	12	72 x 72 x 1,80	3,97	141,17	11,76	4,00	564,69	47,06
	14	2,96	14	91 x 91 x 1,80	4,97	205,87	14,71	4,00	823,50	58,82
	16	2,96	16	72 x 72 x 3,17	6,97	330,32	20,64	4,00	1321,28	82,58
40 / 70 / 83,15	12	2,96	12	100 x 100 x 1,50	4,57	162,38	13,53	4,00	649,52	54,13
	14	2,96	14	72 x 72 x 3,17	6,97	289,03	20,64	4,00	1156,12	82,58
	16	2,96	16	100 x 100 x 3,17	9,66	457,55	28,60	4,00	1830,20	114,39

Fuente: Propia.

Tabla 46. Resumen costos sin optimizar del caso 2.

Resumen caso 2								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Costo tubo superior (\$)	Costo tubos inferiores (2 unidades) (\$)	Costo tubos de amarre (\$)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo total de la propuesta (\$)	Costo \$ / metro lineal
	12	691,20	317,82	470,57	330,17	27,51	1479,59	123,30
40 / 30 / 83,15	14	806,40	511,80	757,78	455,02	32,50	2075,98	148,28
	16	921,60	892,39	1321,28	672,27	42,02	3135,27	195,95
	12	691,20	381,39	564,69	361,65	30,14	1637,28	136,44
40 / 40 / 83,15	14	1017,52	556,19	823,50	529,78	37,84	2397,21	171,23
	16	1162,88	892,39	1321,28	732,59	45,79	3376,55	211,03
	12	691,20	438,69	649,52	390,02	32,50	1779,41	148,28
40 / 70 / 83,15	14	1017,52	780,85	1156,12	641,02	45,79	2954,48	211,03
	16	1412,48	1236,12	1830,20	965,18	60,32	4478,79	279,92

Fuente: Propia.

De acuerdo con el resumen de costos sin optimizar para el caso dos, es posible asegurar que al igual que en el caso uno el costo en cada propuesta de carga incrementa debido a la longitud del soporte de techo. También al igual que el caso uno, el comportamiento es a elevarse conforme aumenta de la propuesta de carga, siendo esta correspondiente a carga temporal de 40 kg/m², carga permanente de 70 kg/m² y carga de viento de 83,15 kg/m² la de mayor costo económico para el caso dos. Además, se identifica

que la propuesta con menor costo económico sería la representada por carga temporal de 40 kg/m², carga permanente de 30 kg/m² y carga de viento de 83,15 kg/m² y doce metros de longitud de soporte de techo.

Por otra parte, el peso de los elementos en el caso dos se consideran desde 27,51 kg por metro lineal hasta 60,32 kg por metro lineal, para un promedio de 39,38 kg por metro lineal de soporte de techo para la propuesta caso 2, según se observa en la tabla 51.

Tabla 47. Costos sin optimizar relacionados a la losa superior (zona superior) del caso 3.

Revisión losa reforzada (Superior) - Concreto											
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Ancho de losa (m)	Espesor de losa (m)	Volumen de concreto en losa (m ³)	Especificación de acero requerido	Área de acero requerido (m ²)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/metro lineal	costo \$ / m ³	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
0 / 30 / 83,15	12	0,30	0,06	0,216	3 # 5	0,0006	518,40	43,20	1518,21	327,93	27,33
	14	0,30	0,06	0,252	3 # 5	0,0006	604,80	43,20	1521,76	383,48	27,39
	16	0,30	0,06	0,288	3 # 6	0,0852	691,20	43,20	2428,99	699,55	43,72
40 / 40 / 83,15	12	0,30	0,06	0,216	3 # 6	0,0852	518,40	43,20	2428,82	524,62	43,72
	14	0,30	0,06	0,252	3 # 6	0,0852	604,80	43,20	2428,92	612,09	43,72
	16	0,30	0,06	0,288	3 # 6	0,0852	691,20	43,20	2428,99	699,55	43,72
40 / 70 / 83,15	12	0,30	0,06	0,216	3 # 6	0,0852	518,40	43,20	2428,82	524,62	43,72
	14	0,30	0,06	0,252	3 # 6	0,0852	604,80	43,20	2428,92	612,09	43,72
	16	0,30	0,06	0,288	3 # 7	0,1161	691,20	43,20	3518,06	1013,20	63,32

Fuente: Propia.

Tabla 48. Costos sin optimizar relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 3.

Revisión en tensión (Tubo inferior)								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	3,31	39,73	3,31	4,00	158,91	13,24
	14	91 x 91 x 1,50	4,14	57,94	4,14	4,00	231,75	16,55
	16	100 x 100 x 1,80	5,48	87,74	5,48	4,00	350,95	21,93
40 / 40 / 83,15	12	72 x 72 x 1,50	3,31	39,73	3,31	4,00	158,91	13,24
	14	100 x 100 x 1,50	4,57	63,98	4,57	4,00	255,90	18,28
	16	72 x 72 x 3,17	6,97	111,55	6,97	4,00	446,20	27,89
40 / 70 / 83,15	12	91 x 91 x 1,50	4,14	49,66	4,14	4,00	198,64	16,55
	14	100 x 100 x 1,80	5,48	76,77	5,48	4,00	307,09	21,93
	16	100 x 100 x 2,37	7,22	115,52	7,22	4,00	462,08	28,88

Fuente: Propia.

Tabla 49. Costos sin optimizar relacionados con los tubos de amarre del caso 3.

Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud total de tubo de amarre (m)	Número de amarres	Tubos de amarre						
				Sección propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (kg/m)	Peso total de los tubos de amarre (kg)	kg/ metro lineal	Costo 4\$/kg	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	8,31	12	72 x 72 x 1,50	3,31	329,98	27,50	4,00	1319,92	109,99
	14	9,60	14	91 x 91 x 1,50	4,14	556,19	39,73	4,00	2224,77	158,91
	16	10,90	16	100 x 100 x 1,80	5,48	956,42	59,78	4,00	3825,69	239,11
40 / 40 / 83,15	12	8,31	12	72 x 72 x 1,50	3,31	329,98	27,50	4,00	1319,92	109,99
	14	9,60	14	100 x 100 x 1,50	4,57	614,16	43,87	4,00	2456,65	175,48
	16	10,90	16	72 x 72 x 3,17	6,97	1215,98	76,00	4,00	4863,91	303,99
40 / 70 / 83,15	12	8,31	12	91 x 91 x 1,50	4,14	412,48	34,37	4,00	1649,90	137,49
	14	9,60	14	100 x 100 x 1,80	5,48	737,00	52,64	4,00	2948,02	210,57
	16	10,90	16	100 x 100 x 2,37	7,22	1259,26	78,70	4,00	5037,04	314,82

Fuente: Propia.

Tabla 50. Resumen de costos sin optimizar del caso 3.

Resumen caso 3								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	costo placa superior (\$)	costo tubos inferiores (2 unidades) (\$)	costo tubos de amarre (\$)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	costo total de la propuesta (\$)	costo \$/ metro lineal
	12	327,93	317,82	1319,92	888,11	74,01	1965,68	163,81
40 / 30 / 83,15	14	383,48	463,49	2224,77	1218,93	87,07	3530,76	252,20
	16	699,55	701,91	3825,69	1735,36	108,46	5669,51	354,34
	12	524,62	317,82	1319,92	888,11	74,01	2282,04	190,17
40 / 40 / 83,15	14	612,09	511,80	2456,65	1282,94	91,64	3831,23	273,66
	16	699,55	892,39	4863,91	2018,73	126,17	7008,80	438,05
	12	524,62	397,28	1649,90	980,54	81,71	2712,15	226,01
40 / 70 / 83,15	14	612,09	614,17	2948,02	1418,58	101,33	4467,92	319,14
	16	1013,20	924,16	5037,04	2065,98	129,12	7232,15	452,01

Fuente: Propia.

De acuerdo con la tabla 50, al igual que en los casos uno y dos los costos aumentan conforme suben las propuestas de carga y la longitud de techo es mayor; asimismo, el de mayor costo económico sería el que representa la propuesta de carga correspondiente a carga temporal de 40 kg/m², carga permanente de 70 kg/m² y carga de viento de 83,15 kg/m² con la longitud de separación de soporte de techo en diez y seis metros y la de menor costo económico la que representa la propuesta de carga correspondiente a carga temporal de 40 kg/m², carga permanente de 30 kg/m² y carga de viento de 83,15 kg/m² con la longitud de separación de soporte de techo en doce metros.

Por otra parte, es importante considerar que para este caso el peso de los elementos va desde 74,01 kg hasta 129,12 kg por metro lineal, con un promedio de 97,06 kg por metro lineal por lo que se concluye que el caso tres es más pesado que los casos uno y dos de acuerdo con las consideraciones realizadas en este documento.

Como se advirtió anteriormente con el fin de disminuir los costos y el peso del elemento, se realiza una optimización de la sección, disminuyendo el espesor del tubo estructural utilizado para cada propuesta alternativa en los extremos. La optimización se logra efectuar para todos los casos de forma positiva.

Por tanto, se muestra para el caso uno los datos optimizados en las tablas 52, 53 y 54 correspondientes a costos relacionados en la propuesta estructural de este caso. Además del resumen de costos una vez optimizados para el caso uno en la tabla 55.

De la misma manera se puede observar para el caso dos, las tablas 56, 57 y 58 correspondientes a costos optimizados en la propuesta de este caso. Además del resumen de costos óptimo para el caso dos en la tabla 59.

Por último, se muestra la recolección de costos mejorados para el caso tres en las tablas 60, 61 y 62; asimismo, se define el resumen del caso en la tabla 63, donde se refleja el cambio de costos de acuerdo con las características del diseño.

Por otra parte, el tema del peso del elemento también se ve afectado por la optimización de los materiales, dicho aspecto es muy importante al ser considerado para el diseño final y costo de los elementos en naves industriales de concreto prefabricado, ya que puede influir considerablemente en otros aspectos de diseño propios del proyecto, tales como cargas en

columnas, vigas y cimentaciones. Es importante recalcar que la optimización de los elementos logró reducir considerablemente el peso en los casos propuestos; en los casos uno y dos se reduce en 15% y en el caso tres 5%, es por ello que también se logra concluir que el caso tres es tres veces más pesado, el esto por su configuración geométrica y la implementación de una placa de concreto reforzada que debido al diseño en flexión debe incluir acero de varilla # 5 como mínimo hasta varilla # 7, volviendo la estructura de peso considerable. De la tabla 51 y la figura 50 anterior es posible concluir que el caso 3 es el que mayor peso genera y el caso 1 es el elemento estructural más liviano. En condiciones óptimas la diferencia entre el caso 3 y el caso 1 es una reducción de 73%.

Por tanto, es conveniente considerar la tabla 51 que sigue con los promedios de peso para cada caso analizado.

Tabla 51. Pesos promedio para elementos de soporte de techo kg/m.

Pesos promedio considerados por elemento kg / metro lineal				
	Longitud total de soporte de techo (m)	Sin Optimizar	Optimizado	% Reducción
Caso 1	12	29,69	25,11	15%
Caso 2	14	39,38	33,40	15%
Caso 3	16	97,06	91,98	5%

Fuente: Propia

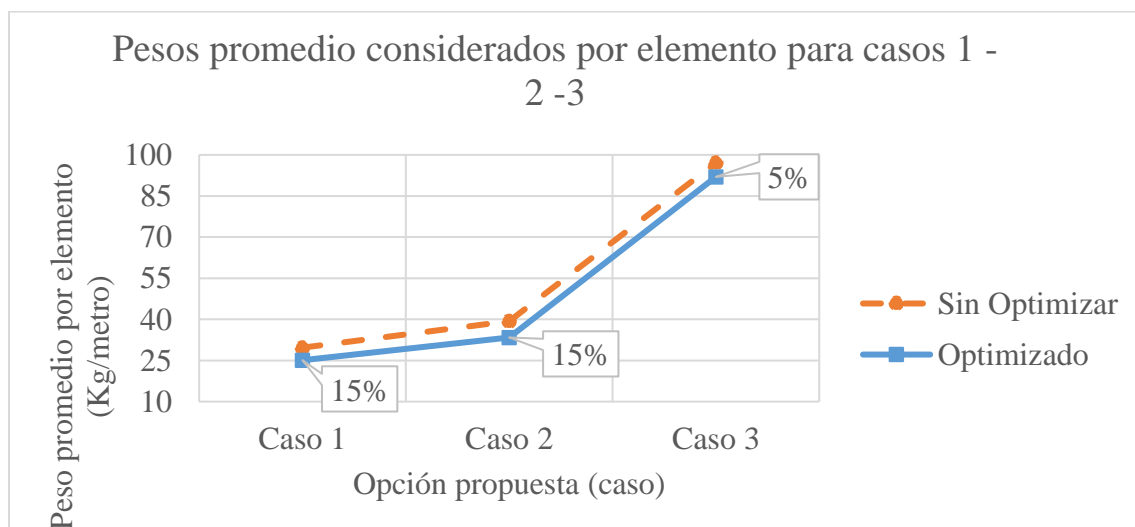


Fig. 50. Relación de pesos promedio por elemento en Kg / metro lineal en función de la opción propuesta en los casos 1, 2 y 3.

Nota: Los porcentajes planteados corresponden a tasas de reducción entre las variables.

Fuente: Propia.

Tabla 52. Costos optimizados relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 1.

Revisión en Compresión (Tubo superior)														
Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud de sección al centro (m)	Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en el centro (Kg)	Longitud de sección a los extremos (m)	Sección Propuesta a los extremos (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en los extremos (Kg)	Peso de la longitud total del soporte de techo (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	6	100 x 100 x 4.75	14,40	86,38	3	100 x 100 x 2.37	7,22	21,66	108,04	9,00	4,00	432,16	36,01
	14	8	100 x 100 x 4.75	14,40	115,17	3	100 x 100 x 3.17	9,66	28,97	144,14	10,30	4,00	576,58	41,18
	16	8	100 x 100 x 6.35	18,17	145,36	4	100 x 100 x 4.75	14,40	57,60	202,96	12,69	4,00	811,84	50,74
40 / 40 / 83.15	12	6	100 x 100 x 4.75	14,40	86,38	3	100 x 100 x 2.37	7,22	21,66	108,04	9,00	4,00	432,16	36,01
	14	6	100 x 100 x 6.35	18,17	109,02	4	100 x 100 x 4.75	14,40	57,60	166,62	11,90	4,00	666,48	47,61
	16	8	100 x 100 x 6.35	18,17	145,36	4	100 x 100 x 4.75	14,40	57,60	202,96	12,69	4,00	811,84	50,74
40 / 70 / 83.15	12	6	100 x 100 x 4.75	14,40	86,38	3	100 x 100 x 3.17	9,66	28,98	115,36	9,61	4,00	461,44	38,45
	14	8	100 x 100 x 6.35	18,17	145,36	3	100 x 100 x 4.75	14,40	43,20	188,56	13,47	4,00	754,24	53,87
	16	6	100 x 100 x 7.94	22,07	132,42	5	100 x 100 x 6.35	18,17	90,85	223,27	13,95	4,00	893,08	55,82

Fuente: Propia

Tabla 53. Costos optimizados relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 1.

Revisión en Tensión (Tubo inferior)														
Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud de sección al centro (m)	Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en el centro (Kg)	Longitud de sección a los extremos (m)	Sección Propuesta a los extremos (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en los extremos (Kg)	Peso de la longitud total del soporte de techo (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	6	72 x 72 x 1.50	3,31	19,86	3	72 x 72 x 1.20	2,65	7,95	27,81	2,32	4,00	111,24	9,27
	14	14	100 x 100 x 1.50	4,57	63,98	0	-	0,00	-	63,98	4,57	4,00	255,90	18,28
	16	6	72 x 72 x 3.17	6,97	41,83	5	72 x 72 x 2.37	5,23	26,15	67,99	4,25	4,00	271,94	17,00
40 / 40 / 83.15	12	6	72 x 72 x 1.80	3,97	23,84	3	72 x 72 x 1.20	2,65	7,95	31,79	2,65	4,00	127,15	10,60
	14	6	72 x 72 x 2.37	5,23	31,39	4	72 x 72 x 1.80	3,97	15,88	47,27	3,38	4,00	189,06	13,50
	16	8	72 x 72 x 3.17	6,97	55,76	4	72 x 72 x 2.37	5,23	20,92	76,68	4,79	4,00	306,72	19,17
40 / 70 / 83.15	12	12	100 x 100 x 1.50	4,57	54,84	0	-	0,00	-	54,84	4,57	4,00	219,36	18,28
	14	6	72 x 72 x 3.17	6,97	41,82	4	72 x 72 x 2.37	5,23	20,92	62,74	4,48	4,00	250,96	17,93
	16	6	100 x 100 x 3.17	9,66	57,94	5	100 x 100 x 2.37	7,22	36,10	94,04	5,88	4,00	376,17	23,51

Fuente: Propia.

Tabla 54. Costos optimizados relacionados con los tubos de amarre del caso 1.

Tubos de amarre										
Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud total de tubo de amarre (m)	Número de amarres	Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso total de los tubos de amarre (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	1,20	12	72 x 72 x 1.20	2,65	38,14	3,18	4,00	152,55	12,71
	14	1,20	14	100 x 100 x 1.50	4,57	76,77	5,48	4,00	307,08	21,93
	16	1,20	16	72 x 72 x 2.37	5,23	100,43	6,28	4,00	401,73	25,11
40 / 40 / 83.15	12	1,20	12	72 x 72 x 1.20	2,65	38,16	3,18	4,00	152,64	12,72
	14	1,20	14	72 x 72 x 1.80	3,97	66,70	4,76	4,00	266,78	19,06
	16	1,20	16	72 x 72 x 2.37	5,23	100,42	6,28	4,00	401,66	25,10
40 / 70 / 83.15	12	1,20	12	100 x 100 x 1.50	4,57	65,81	5,48	4,00	263,23	21,94
	14	1,20	14	72 x 72 x 2.37	5,23	87,86	6,28	4,00	351,46	25,10
	16	1,20	16	100 x 100 x 2.37	7,22	138,62	8,66	4,00	554,50	34,66

Fuente: Propia.

Tabla 55. Resumen de costos optimizados del caso 1.

Resumen caso 1								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Costo tubo superior (\$)	Costo tubos inferiores (2 unidades) (\$)	Costo tubos de amarre (\$)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo total de la propuesta (\$)	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	432,16	222,48	152,55	201,80	16,82	807,19	67,27
	14	576,58	511,80	307,08	348,87	24,92	1395,46	99,68
	16	811,84	543,88	401,73	439,36	27,46	1757,45	109,84
40 / 40 / 83,15	12	432,16	254,30	152,64	209,77	17,48	839,10	69,92
	14	666,48	378,12	266,78	327,85	23,42	1311,38	93,67
	16	811,84	613,44	401,66	456,74	28,55	1826,94	114,18
40 / 70 / 83,15	12	461,44	438,72	263,23	290,85	24,24	1163,39	96,95
	14	754,24	501,92	351,46	401,90	28,71	1607,62	114,83
	16	893,08	752,34	554,50	549,98	34,37	2199,92	137,50

Fuente: Propia.

Tabla 56. Costos optimizados relacionados con la compresión (tubo superior) del caso 2.

Revisión en Compresión (Tubo superior)														
Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud de sección al centro (m)	Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en el centro (Kg)	Longitud de sección a los extremos (m)	Sección Propuesta a los extremos (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en los extremos (Kg)	Peso de la longitud total del soporte de techo (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	5	100 x 100 x 4.75	14,40	72,00	3,5	100 x 100 x 3.17	9,66	33,80	105,80	8,82	4,00	423,20	35,27
	14	7	100 x 100 x 4.75	14,40	100,80	3,5	100 x 100 x 3.17	9,66	33,81	134,61	9,62	4,00	538,44	38,46
	16	11	100 x 100 x 4.75	14,40	158,40	2,5	100 x 100 x 3.17	9,66	24,15	182,55	11,41	4,00	730,20	45,64
40 / 40 / 83.15	12	5	100 x 100 x 4.75	14,40	72,00	3,5	100 x 100 x 3.17	9,66	33,81	105,81	8,82	4,00	423,24	35,27
	14	5	100 x 100 x 6.35	18,17	90,85	4,5	100 x 100 x 4.75	14,40	64,80	155,65	11,12	4,00	622,60	44,47
	16	9	100 x 100 x 6.35	18,17	163,53	3,5	100 x 100 x 4.75	14,40	50,40	213,93	13,37	4,00	855,72	53,48
40 / 70 / 83.15	12	7	100 x 100 x 4.75	14,40	100,80	2,5	100 x 100 x 3.17	9,66	24,15	124,95	10,41	4,00	499,80	41,65
	14	7	100 x 100 x 6.35	18,17	127,19	3,5	100 x 100 x 4.75	14,40	50,40	177,59	12,69	4,00	710,36	50,74
	16	5	100 x 100 x 7.94	22,07	110,35	5,5	100 x 100 x 6.35	18,17	99,94	210,29	13,14	4,00	841,14	52,57

Fuente: Propia.

Tabla 57. Costos optimizados relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 2.

Revisión en Tensión (Tubo inferior)														
Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud de sección al centro (m)	Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en el centro (Kg)	Longitud de sección a los extremos (m)	Sección Propuesta a los extremos (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en los extremos (Kg)	Peso de la longitud total del soporte de techo (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	6	72 x 72 x 1.50	3,31	19,86	3	72 x 72 x 1.20	2,65	7,95	27,81	2,32	4,00	111,24	9,27
	14	14	100 x 100 x 1.50	4,57	63,98	0	-	0,00	0,00	63,98	4,57	4,00	255,90	18,28
	16	6	72 x 72 x 3.17	6,97	41,83	5	72 x 72 x 2.37	5,23	26,15	67,99	4,25	4,00	271,94	17,00
40 / 40 / 83.15	12	6	72 x 72 x 1.80	3,97	23,84	3	72 x 72 x 1.20	2,65	7,95	31,79	2,65	4,00	127,15	10,60
	14	14	91 x 91 x 1.80	4,97	69,52	0	-	0,00	0,00	69,52	4,97	4,00	278,10	19,86
	16	6	72 x 72 x 3.17	6,97	41,83	5	72 x 72 x 2.37	5,23	26,16	67,99	4,25	4,00	271,96	17,00
40 / 70 / 83.15	12	12	100 x 100 x 1.50	4,57	54,84	0	-	0,00	0,00	54,84	4,57	4,00	219,34	18,28
	14	6	72 x 72 x 3.17	6,97	41,83	4	72 x 72 x 2.37	5,23	20,93	62,76	4,48	4,00	251,03	17,93
	16	6	100 x 100 x 3.17	9,66	57,94	5	100 x 100 x 2.37	7,22	36,10	94,04	5,88	4,00	376,17	23,51

Fuente: Propia.

Tabla 58. Costos optimizados relacionados con los tubos de amarre del caso 2.

Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud total de tubo de amarre (m)	Número de amarres	Tubos de amarre						
				Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso total de los tubos de amarre (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	2,96	12	72 x 72 x 1.20	2,65	94,11	7,84	4,00	376,45	31,37
	14	2,96	14	100 x 100 x 1.50	4,57	189,44	13,53	4,00	757,78	54,13
	16	2,96	16	72 x 72 x 2.37	5,23	247,83	15,49	4,00	991,33	61,96
40 / 40 / 83.15	12	2,96	12	72 x 72 x 1.20	2,65	94,17	7,85	4,00	376,66	31,39
	14	2,96	14	91 x 91 x 1.80	4,97	205,87	14,71	4,00	823,50	58,82
	16	2,96	16	72 x 72 x 2.37	5,23	247,87	15,49	4,00	991,49	61,97
40 / 70 / 83.15	12	2,96	12	100 x 100 x 1.50	4,57	162,38	13,53	4,00	649,52	54,13
	14	2,96	14	72 x 72 x 2.37	5,23	216,89	15,49	4,00	867,55	61,97
	16	2,96	16	100 x 100 x 2.37	7,22	342,08	21,38	4,00	1368,31	85,52

Fuente: Propia.

Tabla 59. Resumen de costos optimizados del caso 2.

Resumen caso 2								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Costo tubo superior (\$)	Costo tubos inferiores (2 unidades) (\$)	Costo tubos de amarre (\$)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo total de la propuesta (\$)	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	423,20	222,48	376,45	255,53	21,29	1022,13	85,18
	14	538,44	511,80	757,78	452,00	32,29	1808,02	129,14
	16	730,20	543,88	991,33	566,35	35,40	2265,41	141,59
40 / 40 / 83,15	12	423,24	254,30	376,66	263,55	21,96	1054,20	87,85
	14	622,60	556,19	823,50	500,57	35,76	2002,29	143,02
	16	855,72	543,91	991,49	597,78	37,36	2391,12	149,45
40 / 70 / 83,15	12	499,80	438,69	649,52	397,00	33,08	1588,01	132,33
	14	710,36	502,06	867,55	519,99	37,14	2079,97	148,57
	16	841,14	752,34	1368,31	740,45	46,28	2961,80	185,11

Fuente: Propia.

Tabla 60. Costos sin optimizar relacionados con la losa superior (zona superior) del caso 3.

Revisión losa reforzada (Superior) - Concreto											
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Ancho de losa (m)	Espesor de losa (m)	Volumen de concreto en losa (m ³)	Especificación de acero requerido	Área de acero requerido (m ²)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/metro lineal	costo \$ / m ³	Costo \$	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	0,3	0,06	0,216	3 # 5	0,0006	518,40	43,20	1518,21	327,93	27,33
	14	0,3	0,06	0,252	3 # 5	0,0006	604,80	43,20	1521,76	383,48	27,39
	16	0,3	0,06	0,288	3 # 6	0,0852	691,20	43,20	2428,99	699,55	43,72
40 / 40 / 83,15	12	0,3	0,06	0,216	3 # 6	0,0852	518,40	43,20	2428,82	524,62	43,72
	14	0,3	0,06	0,252	3 # 6	0,0852	604,80	43,20	2428,92	612,09	43,72
	16	0,3	0,06	0,288	3 # 6	0,0852	691,20	43,20	2428,99	699,55	43,72
40 / 70 / 83,15	12	0,3	0,06	0,216	3 # 6	0,0852	518,40	43,20	2428,82	524,62	43,72
	14	0,3	0,06	0,252	3 # 6	0,0852	604,80	43,20	2428,92	612,09	43,72
	16	0,3	0,06	0,288	3 # 7	0,1161	691,20	43,20	3518,06	1013,20	63,32

Fuente: Propia.

Para el caso tres, se hace una evaluación de costos de la losa reforzada de acuerdo con el presupuesto que se anexa en las figuras B-1, B-2, B-3, B-4, B-5 y B-6, y donde se ilustra el cambio de costos de acuerdo con las diferentes longitudes y el refuerzo requerido en cada caso y de acuerdo con los resultados se establece el costo por metro cúbico que se muestra en la tabla 60 anteriormente dada.

Tabla 61. Costos optimizados relacionados con la tensión (tubos inferiores) del caso 3.

Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud total de tubo de amarre (m)	Número de amarres	Sección Propuesta en el centro (mm)	Tubos de amarre						
					Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso total de los tubos de amarre (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal	
40 / 30 / 83.15	12	8,31	12	72 x 72 x 1.20	2,65	263,98	22,00	4,00	1055,93	87,99	
	14	9,60	14	91 x 91 x 1.50	4,14	556,19	39,73	4,00	2224,77	158,91	
	16	10,90	16	100 x 100 x 1.50	4,57	797,01	49,81	4,00	3188,03	199,25	
40 / 40 / 83.15	12	8,31	12	72 x 72 x 1.20	2,65	263,98	22,00	4,00	1055,93	87,99	
	14	9,60	14	100 x 100 x 1.50	4,57	614,16	43,87	4,00	2456,65	175,48	
	16	10,90	16	72 x 72 x 2.37	5,23	912,32	57,02	4,00	3649,30	228,08	
40 / 70 / 83.15	12	8,31	12	91 x 91 x 1.50	4,14	412,48	34,37	4,00	1649,90	137,49	
	14	9,60	14	100 x 100 x 1.50	4,57	614,16	43,87	4,00	2456,65	175,48	
	16	10,90	16	100 x 100 x 1.80	5,48	955,78	59,74	4,00	3823,13	238,95	

Fuente: Propia.

Tabla 62. Costos optimizados relacionados con los tubos de amarre del caso 3.

Propuesta de carga CT/CP/CV (Kg/m²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Longitud de sección al centro (m)	Sección Propuesta en el centro (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en el centro (Kg)	Revisión en Tensión (Tubo inferior)								
						Longitud de sección a los extremos (m)	Sección Propuesta a los extremos (mm)	Peso unitario de la sección H.N. (Kg/m)	Peso de la sección en los extremos (Kg)	Peso de la longitud total del soporte de techo (Kg)	Kg/ metro lineal	costo 4\$/kg	costo \$	costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83.15	12	6	72 x 72 x 1.50	3,31	19,86	3	72 x 72 x 1.20	2,65	7,95	27,81	2,32	4,00	111,24	9,27
	14	14	91 x 91 x 1.50	4,14	57,94	0	-	0,00	57,94	4,14	4,00	231,75	16,55	
	16	6	100 x 100 x 1.80	5,48	32,90	5	100 x 100 x 1.50	4,57	22,85	55,75	3,48	4,00	223,00	13,94
40 / 40 / 83.15	12	6	72 x 72 x 1.50	3,31	19,86	3	72 x 72 x 1.20	2,65	7,95	27,81	2,32	4,00	111,24	9,27
	14	14	100 x 100 x 1.50	4,57	63,98	0	-	0,00	63,98	4,57	4,00	255,90	18,28	
	16	6	72 x 72 x 3.17	6,97	41,83	5	72 x 72 x 2.37	5,23	26,15	67,99	4,25	4,00	271,94	17,00
40 / 70 / 83.15	12	12	91 x 91 x 1.50	4,14	49,66	0	-	0,00	49,66	4,14	4,00	198,64	16,55	
	14	6	100 x 100 x 1.80	5,48	32,90	4	100 x 100 x 1.50	4,57	18,28	51,18	3,66	4,00	204,72	14,62
	16	6	100 x 100 x 2.37	7,22	43,32	5	100 x 100 x 1.80	5,48	27,40	70,72	4,42	4,00	282,88	17,68

Fuente: Propia.

Tabla 63. Resumen de costos optimizados del caso 3.

Resumen caso 3								
Propuesta de carga C.T./C.P./C.V. (kg/m ²)	Longitud total de soporte de techo (m)	Costo placa superior (\$)	Costo tubos inferiores (2 unidades) (\$)	Costo tubos de amarre (\$)	Peso de la longitud total del soporte de techo (kg)	kg/ metro lineal	Costo total de la propuesta (\$)	Costo \$ / metro lineal
40 / 30 / 83,15	12	64,69	222,48	1055,93	425,40	35,45	1343,09	111,92
	14	74,87	463,49	2224,77	806,68	57,62	2763,14	197,37
	16	85,06	446,00	3188,03	1091,06	68,19	3719,10	232,44
40 / 40 / 83,15	12	64,69	222,48	1055,93	425,41	35,45	1343,09	111,92
	14	74,87	511,80	2456,65	897,76	64,13	3043,33	217,38
	16	85,06	543,88	3649,30	1262,22	78,89	4278,24	267,39
40 / 70 / 83,15	12	64,69	397,28	1649,90	636,75	53,06	2111,88	175,99
	14	74,87	409,45	2456,65	894,11	63,87	2940,97	210,07
	16	85,06	565,76	3823,13	1307,51	81,72	4473,95	279,62

Fuente: Propia.

El tema de costos es importante para determinar el sistema constructivo de larguero que mejor convenga utilizar, de esta manera se va a encontrar finalmente el sistema óptimo apto para las necesidades estructurales y económicas del cliente. Por esta razón se analizan todas las opciones, tanto con materiales optimizados como sin optimizar; igualmente para cada uno de los tres casos evaluados y las propuestas de cargas realizadas, de esta manera se obtiene la cuantificación de datos resumida en las tablas 64, 65 y 66 y los gráficos de las figuras 51, 52 y 53 que representan la relación de costo por metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo.

De acuerdo con los gráficos planteados en las figuras 51, 52 y 53 es claro afirmar que los costos optimizados son positivos para las tres opciones planteadas, por lo que se tabulan los datos en la tabla 67 y se demuestra mediante el gráfico representado en la figura 54 que el caso tres es efectivamente el de mayor costo económico y el caso uno el de menor costo, por otro lado el caso dos se mantiene en medio de ambos, mostrándose así como una posibilidad intermedia a escala de costos.

Es posible afirmar que el caso tres es el más costoso económicamente, debido a su configuración de materiales constructivos, pues al incluir una losa reforzada aumenta considerablemente los costos, debido a que el refuerzo de la placa es elevado por diseño en flexión, aparte de incluir más elementos para su construcción tales como encofrado, amarres y mayor mano de obra. Por otro lado, los casos uno y dos son más económicos al incluir únicamente acero; sin embargo, el caso dos por el peso del elemento estructural más elevado representa un costo mayor.

Tabla 64. Tabla comparativa de la relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m² / C.P.=30 kg/m² / C.V. = 83,15 kg/m².

Propuesta de carga C.T.=40 kg/m ² / C.P.=30 kg/m ² /C.V.=83,15 kg/m ²				
	Longitud total de soporte de techo (m)	Sin optimizar	Optimizado	% Reducción
Caso 1	12	99,96	67,27	33%
Caso 1	14	116,08	99,68	14%
Caso 1	16	161,92	109,84	32%
Caso 2	12	123,30	85,18	31%
Caso 2	14	148,28	129,14	13%
Caso 2	16	195,95	141,59	28%
Caso 3	12	163,81	133,86	18%
Caso 3	14	252,20	219,41	13%
Caso 3	16	354,34	270,85	24%

Fuente: Propia.

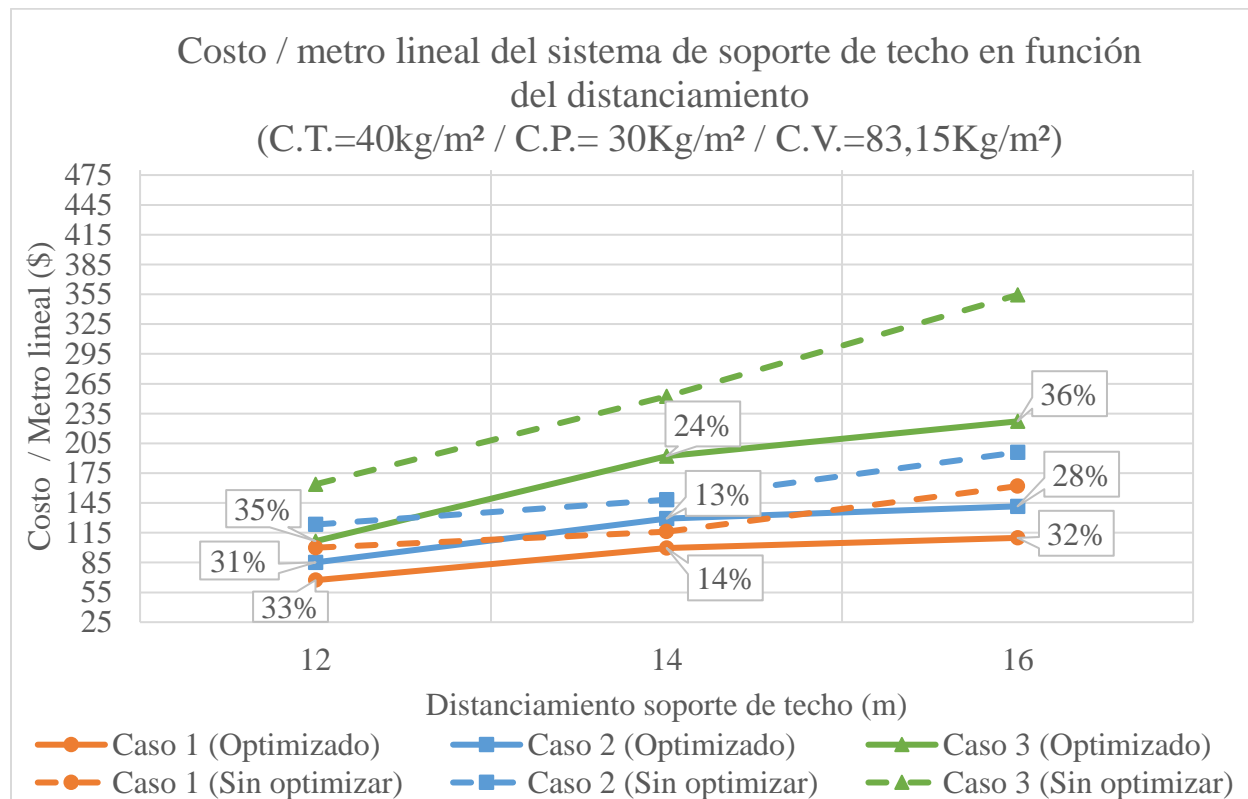


Fig. 51. Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m² / C.P.=30 kg/m² / C.V. = 83,15 kg/m².

Nota: Los porcentajes expresados corresponden a tasas de reducción entre las variables.

Fuente: Propia.

Tabla 65. Tabla comparativa de la relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m² / C.P.=40 kg/m² / C.V. = 83,15 kg/m².

Propuesta de carga C.T.=40 kg/m ² / C.P.=40 kg/m ² /C.V.=83,15 kg/m ²				
	Longitud total de soporte de techo (m)	Sin optimizar	Optimizado	% Reducción
Caso 1	12	108,44	69,92	36%
Caso 1	14	139,63	93,67	33%
Caso 1	16	161,90	114,18	29%
Caso 2	12	136,44	87,85	36%
Caso 2	14	171,23	143,02	16%
Caso 2	16	211,03	149,45	29%
Caso 3	12	190,17	150,25	21%
Caso 3	14	273,66	255,75	7%
Caso 3	16	438,05	305,80	30%

Fuente: Propia.

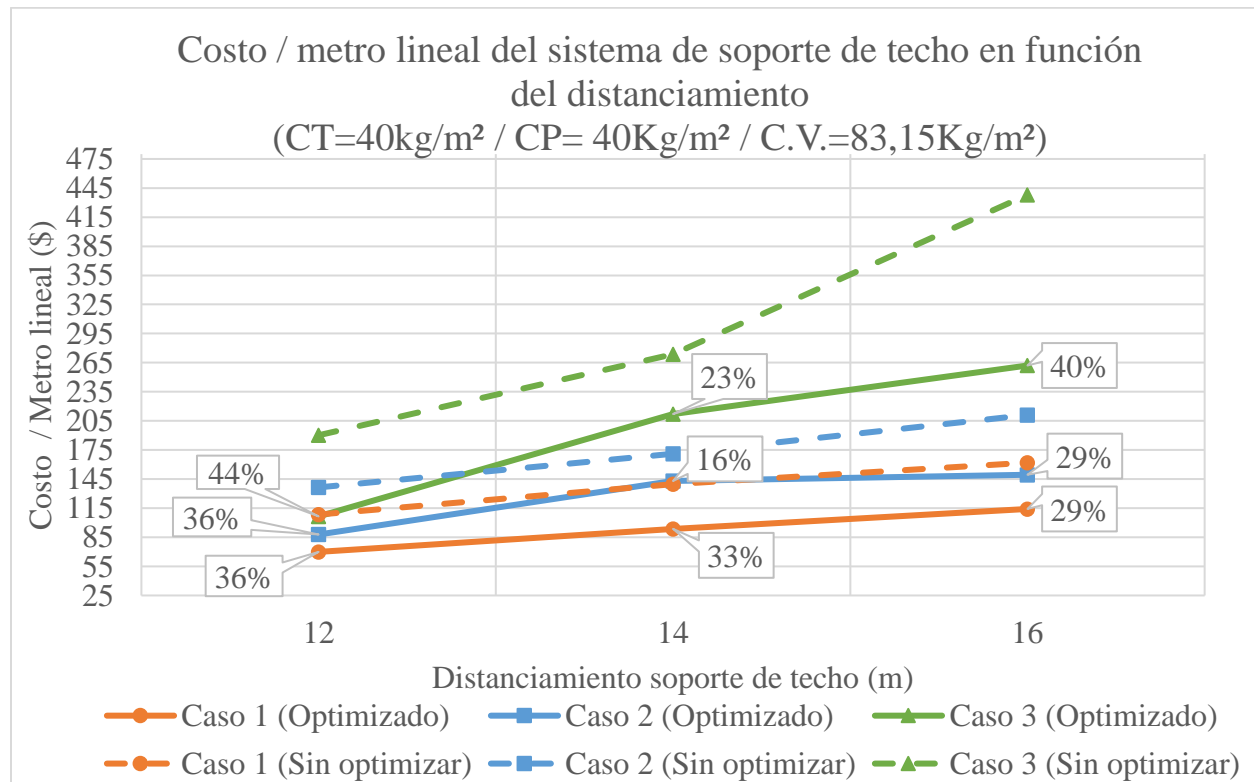


Fig. 52. Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m² / C.P.=40 kg/m² / C.V. = 83,15 kg/m².

Nota: Los porcentajes expresados corresponden a tasas de reducción entre las variables.

Fuente: Propia.

Tabla 66. Tabla comparativa de la relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m² / C.P.=70 kg/m² / C.V. = 83,15 kg/m².

Propuesta de carga C.T.=40 kg/m ² / C.P.=70 kg/m ² /C.V.=83,15 kg/m ²				
	Longitud total de soporte de techo (m)	Sin optimizar	Optimizado	% Reducción
Caso 1	12	116,08	96,95	16%
Caso 1	14	161,90	114,83	29%
Caso 1	16	211,89	137,50	35%
Caso 2	12	148,28	132,33	11%
Caso 2	14	211,03	148,57	30%
Caso 2	16	279,92	185,11	34%
Caso 3	12	226,01	214,32	5%
Caso 3	14	319,14	248,44	22%
Caso 3	16	452,01	337,63	25%

Fuente: Propia.

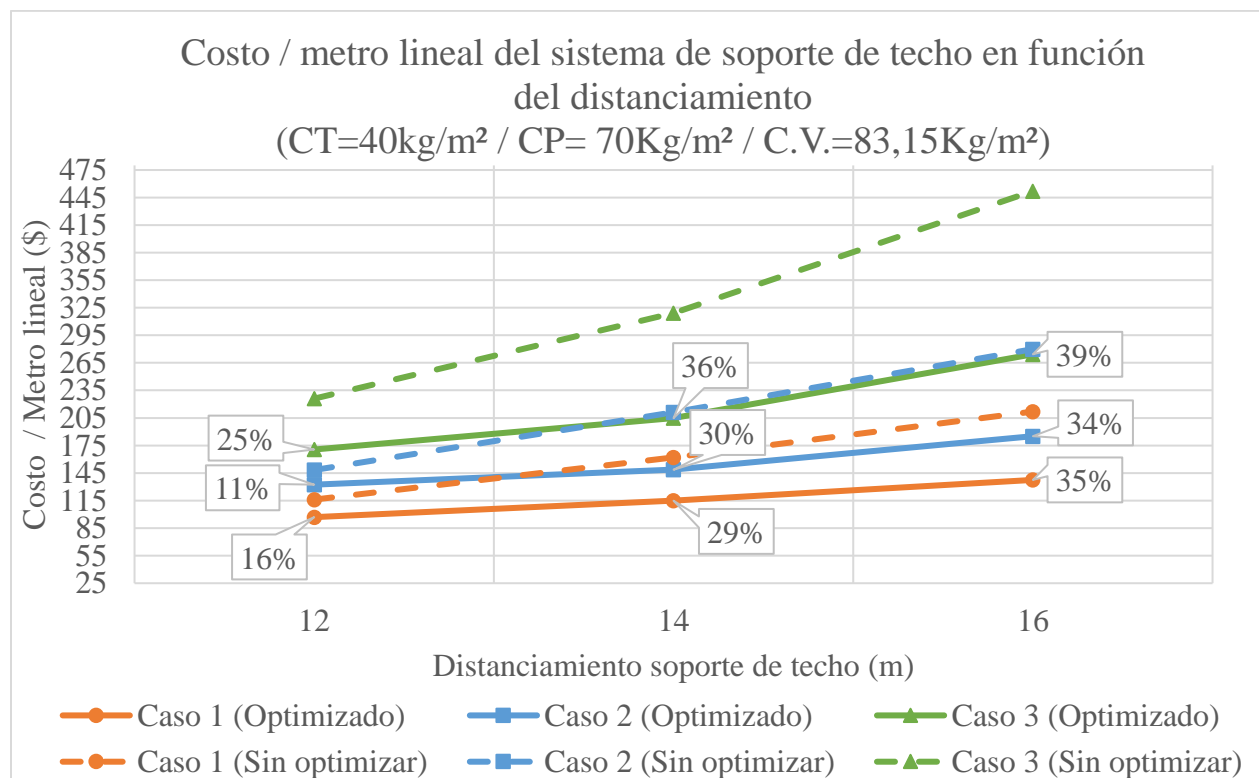


Fig. 53. Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para la propuesta de carga C.T. = 40 kg/m² / C.P.=70 kg/m² / C.V. = 83,15 kg/m².

Nota: Los porcentajes expresados corresponden a tasas de reducción entre las variables.

Fuente: Propia.

Tabla 67 Tabla datos propuesta de costos / metro lineal para los casos 1 - 2 - 3

Propuesta de costos / metro lineal para los casos 1 - 2 - 3			
Longitud total de soporte de techo (m)	12.00	14.00	16.00
Caso 1 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=30 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	67,27	99,68	109,84
Caso 1 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=40 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	69,92	93,67	114,18
Caso 1 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=70 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	96,95	114,83	137,50
Caso 2 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=30 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	85,18	129,14	141,59
Caso 2 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=40 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	87,85	143,02	149,45
Caso 2 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=70 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	132,33	148,57	185,11
Caso 3 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=30 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	106,53	192,02	227,13
Caso 3 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=40 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	106,53	212,03	262,07
Caso 3 - C.T. =40 Kg/m ² / C.P.=70 Kg/m ² / C.V.=83,15 Kg/m ²	226,01	319,14	452,01

Fuente: Propia.

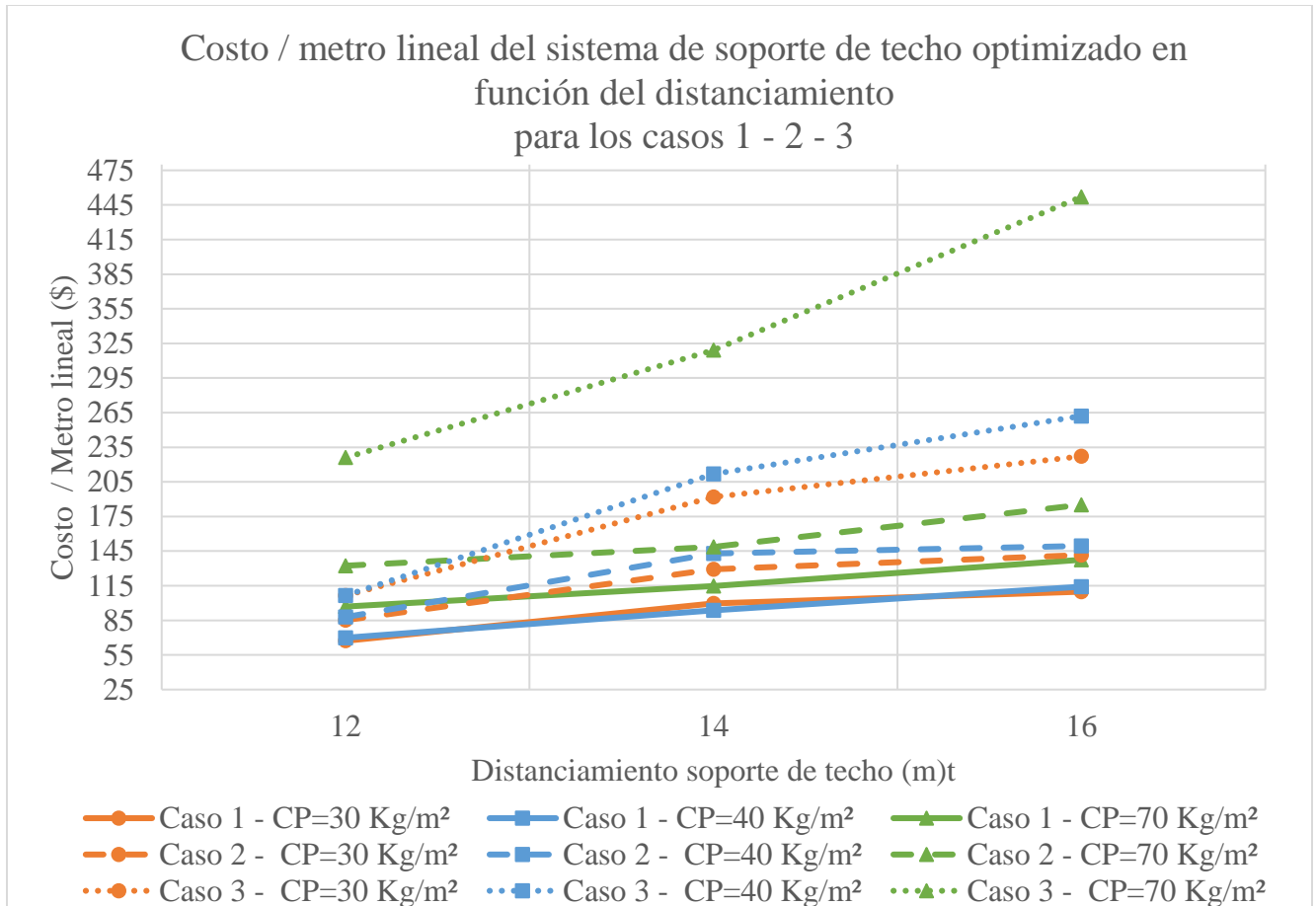


Fig. 54 Relación de costo/ metro lineal en función del distanciamiento de soporte de techo para los casos 1 - 2 - 3

Nota: Los porcentajes expresados corresponden a tasas de reducción entre las variables.

Fuente: Propia.

De acuerdo con la recopilación de datos que se observa en las tablas 64, 65 y 66 en conjunto con los diagramas que se detallan en las figuras 51, 52 y 53, es posible confirmar que la optimización del sistema constructivo reduce considerablemente los costos desde 5% hasta 36% en los diferentes casos propuestos, por lo que se concluye que vale la pena considerar la optimización.

Como es de esperarse, los costos incrementan conforme se amplía la longitud de soporte de techo y suben las cargas propuestas de diseño. Además, de acuerdo con las figuras 51, 52 y 53, se deduce que los costos aumentan conforme los casos, esto quiere decir que de acuerdo con el cálculo de costos económicos realizados el caso uno en todas las iteraciones de carga y

longitudes es más económico que el caso dos y tres; también, por otro lado, se deduce que el caso tres es el más caro en cuanto a costos económicos.

4.5 Planteamiento de soluciones para cubierta de techo.

Con el fin de determinar la mejor solución constructiva en cuanto a cubierta de techo, se realiza un estudio para conocer la oferta en el mercado nacional sobre opciones de láminas, además de estar al tanto de la separación entre largueros de techo recomendada para cada una de las opciones del mercado; de esta manera es posible identificar cuál es la mejor solución, que además cumpla con las normativas y una longitud de tres metros de separación como mínimo. La tabla 68 muestra diferentes láminas de cubierta utilizadas en el mercado nacional con su correspondiente comparativa de eficacia en relación con su longitud libre, la cual se resume de forma gráfica en la figura 55.

En la figura 56 es posible identificar con claridad los tipos de cubierta que cumplen con el requerimiento en longitud de tres metros de separación, como mínimo, entre largueros de techo, y saber cuáles se descartan por sus características dadas en la tabla 68, por lo que es importante recalcar que dichas características aplican únicamente en condición de apoyo múltiple.

Por lo anterior, se define como opciones óptimas para cubierta sencilla: el uso de lámina grapada con perfil de ancho 304 mm y peralte 105 mm o bien, canaleta estructural.

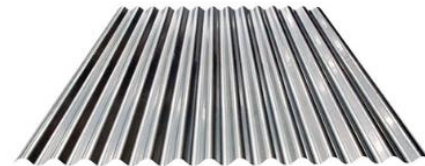
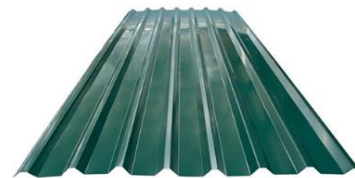
También, como posibilidades en caso de que el proyecto requiera cubierta compuesta: lámina con perfil ancho 502 mm y peralte 76mm, perfil ancho 457 mm y peralte 100 mm o lámina con perfil ancho 457 mm y peralte 113 mm.

Sin embargo, como recomendación dada por las diferentes casas distribuidoras de lámina de techo y profesionales experimentados en el tema, es conveniente utilizar láminas de techo, en la medida de lo posible, que presenten holgura para el distanciamiento entre largueros tales como se muestra en el diagrama de la figura 55 para tres metros de distanciamiento, por lo que es conveniente el uso de lámina grapada con perfil de ancho 304 mm y peralte 105 mm o bien, canaleta estructural.

Tabla 68. Tabla comparativa de eficacia para los sistemas de techo en función de longitud libre.

Eficacia de los sistemas de techo en función de la longitud libre			
Sistema lámina de techo	Combinación de calibres para las pruebas	Separación máxima de largueros (m)	Perfil
Grapada sencilla ancho = 502mm peralte = 38mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm	1,00	
		1,20	
		1,30	
Grapada sencilla ancho = 457mm peralte = 50mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm	1,20	
		1,40	
		1,60	
Grapada sencilla ancho = 250mm peralte = 50mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm	1,00	
		1,20	
		1,40	
Grapada sencilla ancho = 304mm peralte = 105mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm	2,00	
		2,50	
		3,00	
Grapada sencilla ancho = 406mm peralte = 64mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm	1,50	
		1,75	
		2,00	
Grapada compuesta ancho = 502mm peralte = 76mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm (Inferior)	1,75	
		2,00	
		3,00	
Grapada compuesta ancho = 457mm peralte = 100mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm (Inferior)	2,00	
		2,50	
		3,00	
Grapada compuesta ancho = 457mm peralte = 113mm	26 = 0,45mm 24= 0,61mm (Inferior)	2,00	
		2,50	
		3,00	

Acanalada rectangular	26 = 0,45mm 28 = 0,29mm	0,84
		0,96
		1,14
		1,17
Acanalada ondulada	26 = 0,45mm 28 = 0,29mm	0,84
		0,96
		1,14
		1,17
Canaleta estructural	26 = 0,45mm 28 = 0,29mm	3,5



Fuente: Industrias Construtec S.A. y Metalco, 2019

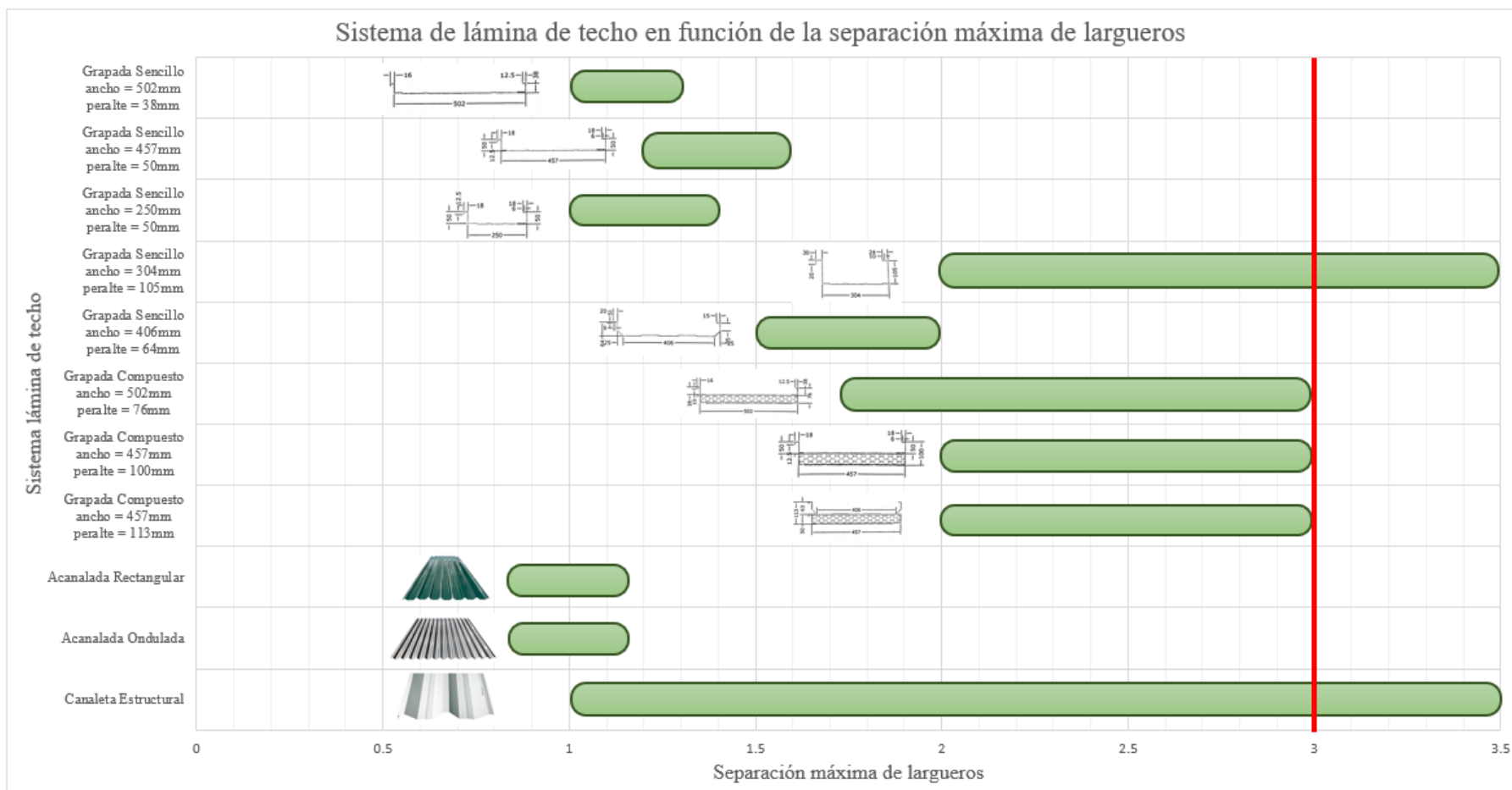


Fig. 55 Gráfico de eficacia para los sistemas de techo en función de la separación máxima de largueros.
Fuente: Propia.

CONCLUSIONES

En síntesis, producto de los diseños y análisis estructurales cuantitativos realizados en el presente documento se evaluaron tres opciones constructivas (casos) con geometría triangular y trapezoidal, el diseño para cada una de las tres posibilidades con cargas diferentes, según se determinó de acuerdo con un breve estudio de mercado: la carga permanente puede variar dependiendo del uso que se le dé a la estructura y sus características entre 30 kg/m², 40 kg/m² y 70 kg/m²; así como la iteración de las variables mencionadas anteriormente con tres condiciones de distanciamiento entre largueros: 12 metros, 14 metros y 16 metros; se obtuvo de esta manera, valores de carga satisfactorios para cumplir con las normativas y combinaciones de carga que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2010, así como aspectos relevantes en cuanto al viento establecidos en la Ley de Construcciones y su Reglamento 2009.

La combinación de cargas aplicadas a un sistema de soporte de techo (larguero) con geometría triangular, en longitudes superiores a doce metros, es una opción viable para la optimización de naves industriales de concreto prefabricado; al optimizar la sección de larguero de techo también se disminuye el peso de la sección estructural y con ello la aplicación de cargas para todos los elementos que conforman la nave industrial, optimizando también marcos soportantes, columnas, cimentaciones, entre otros. Por lo que se obtiene que la hipótesis planteada en este estudio es verdadera.

En el caso de las cargas temporales por utilizar, se establece de acuerdo con la tabla 6.1 del Código Sísmico de Costa Rica 2010 un aporte de 40 kg/m² para techos, el cual no varía según el uso de la infraestructura. Por otra parte, para el caso de las cubiertas y techos es indispensable evaluar las condiciones de viento, las cuales se describen en la Ley de Construcciones y su Reglamento 2009, vigente en Costa Rica. Dado que el análisis será para soportes de techo exclusivamente en naves industriales, se toma en cuenta como condición crítica construcciones abiertas frente al mar y sitios similares con una altura comúnmente utilizada de 10 metros sobre el terreno. Por lo anterior la presión básica por utilizar es de 105,00 kg/m² con pendiente de aproximadamente 8°; con lo que se obtiene una presión última de diseño de 83,15 kg/m².

De acuerdo con el análisis realizado en el presente documento respecto a las cargas y condiciones críticas de diseño, con la visita realizada a cuatro bodegas de tipo industrial

construidas en concreto prefabricado en Costa Rica y la visita a dos importantes empresas de diseño estructural en Costa Rica, encargadas del diseño y asesoramiento de bodegas de uso industrial: I.E.C.A. Internacional S.A. y Productos de Concreto S.A., se logra corroborar y validar la información expuesta sobre parámetros utilizados para el diseño, tales como la importancia de la geometría, materiales constructivos, cargas de diseño y costos asociados a los materiales.

Las condiciones críticas de diseño para naves industriales de concreto prefabricado actualmente se evalúan respecto a las necesidades del cliente y la creciente demanda en la construcción y remodelación de estas la cual va en aumento; de acuerdo con el periódico *El Financiero*, según los datos del último trimestre 2018, en la Gran Área Metropolitana se encuentran en construcción proyectos que suman 133 300 m². Debido a lo anterior se evalúan las necesidades fundamentales del uso que se le dará a la estructura y deberán entre otras cosas soportar elementos electromecánicos de gran peso, paneles solares, estructuras livianas, elementos de cielo raso, equipos de aire acondicionado, cargas gravitacionales y condiciones de viento. Existen varios escenarios que modifican las condiciones de diseño, por ejemplo, en la industria médica, la cual exige soporte de mayor demanda de cargas, debido a que los largueros deben resistir equipos especializados, tubería adicional y otros elementos que aportan peso a la estructura, por ello la importancia de evaluar primeramente las condiciones del diseño y así evitar estructuras sobre diseñadas que incrementan considerablemente los costos económicos de la obra.

En Costa Rica, es común para el diseño de soportes de techo en naves industriales de concreto prefabricado el uso de largueros de acero laminado en frío con perfil tipo “Z” cuando se requiere utilizar las propiedades de dicho material en cuanto a su resistencia, durabilidad, bajo mantenimiento y peso, ya que es más liviano que el concreto. También es usual el uso en naves industriales de concreto prefabricado con perfil tipo “T” en concreto pretensado y de sección variable, aunque este aporta mayor peso a la estructura, es utilizado entre otras cosas por su alta resistencia. Por lo expuesto, la elección de la configuración geométrica y los materiales constructivos seleccionados son de suma importancia, este documento contempla las características más relevantes de los perfiles mayormente utilizados en el mercado costarricense mejorando las condiciones para hacerlo una propuesta de óptimos resultados. En el caso uno y dos se utiliza como material fundamental el acero, aprovechando su característica principal de alta resistencia y durabilidad; mientras que en el caso tres se muestra una propuesta alternativa

utilizando tanto acero como concreto, con lo que se convierte en una propuesta altamente rígida y resistente a tensión, que además es una buena opción si se debe certificar contra fuego.

Por otro lado, utilizando las condiciones de carga descritas anteriormente se realiza el diseño de tres propuestas alternativas, considerando diferencias geométricas entre ellas ; con ayuda del *software* de análisis estructural SAP 2000 se obtienen los valores críticos en compresión y tensión de los elementos, dichos valores se deben revisar hasta que los materiales que conforman el elemento cumplan con los resultados esperados o superiores, pero para lograrlo se debe iterar tamaños y espesores del acero; una vez que los valores en compresión y tensión cumplen se concluyen tres opciones de diseño óptimas a escala estructural mediante el uso conveniente de los materiales constructivos. Es importante recalcar la importancia en la elección de una óptima configuración geométrica, debido a que se producen diferencias significativas en cuanto a peso propio de la estructura, la cual modifica directamente al diseño, afectando de esta manera la relación demanda – capacidad, pero por otro lado, la relación de esbeltez juega un papel importante para el diseño, debido a que aporta relación de rigidez a la sección transversal del larguero siendo esta una característica mecánica fundamental para la estructura.

Además, con base en el diseño óptimo de los elementos estructurales se obtienen las demandas de cargas tanto en tensión como compresión, necesarias para realizar un análisis comparativo de desempeño estructural para cada una de las propuestas alternativas, cuyo resultado consiste en que para todos los casos las demandas en compresión y tensión se dan en forma ascendente conforme aumenta la longitud de sección de larguero, ya que a mayor distanciamiento entre apoyos, mayor será la carga que debe ser soportada por el elemento estructural.

Dentro del análisis expuesto se muestra que en el caso dos se dan las mayores demandas de carga y las menores se dan en el caso tres, y esta es la opción de mayor desempeño estructural. Además, se demostró que el uso de materiales constructivos diferentes provoca que la carga en tensión generada para el caso tres sea mayor que el caso uno y dos, debido a que en la posibilidad tres se utilizó mezcla de acero y concreto donde el refuerzo en flexión de losa lleva acero de diseño como mínimo varilla #5 grado 60 hasta varilla #7, lo cual aumenta considerablemente el peso propio del elemento, convirtiéndolo en una sección tres veces más pesada a pesar de que la optimización de los materiales logra reducir un 5%, contrario al caso uno y dos que utilizan únicamente acero, producto de la optimización de materiales constructivos se

logró reducir el peso 15%; otro factor es que se modificó la configuración geométrica cambiando la distribución de la combinación de carga mediante el elemento. En el caso dos en comparación con el uno, se muestra un poco más elevada la demanda, pues si se compara con el caso uno lleva más acero, resultado de los tubos diagonales de su configuración geométrica. Se concluye que el caso tres es el que mayor peso genera y el uno es el elemento estructural más liviano. En condiciones óptimas la diferencia entre el caso tres y el uno es una reducción del peso de 73%.

Frente a la evidencia recaudada es importante recalcar que la opción óptima debe ser estudiada de acuerdo con las necesidades constructivas del cliente, ya que es posible identificar el sistema constructivo mayormente factible, variando las cargas y la luces entre marcos estructurales de acuerdo con los requerimientos del proyecto. El elegir incorrectamente las cargas que afectarán la estructura puede incurrir en un incremento del costo económico de 35% hasta 60% en el caso más crítico, mientras que la elección de la longitud del larguero puede afectar de 40% hasta 50% en el costo del elemento.

Se realiza un análisis comparativo de costos para cada una de las propuestas alternativas las cuales son estructuralmente factibles, como es de esperarse los costos incrementan conforme se amplía la longitud del elemento debido a que aumentan las cargas propuestas de diseño y, por lo tanto, también el peso de la estructura. Cabe recalcar que para el cálculo de dichos costos se utilizaron parámetros de referencia, por ejemplo: para los elementos de acero se utilizó el costo con base en la experiencia de la empresa Productos de Concreto S.A. y el peso de cada elemento propuesto según sus características de diseño, pero por otro lado, el costo de la losa reforzada fue calculado utilizando parámetros de diseño de forma detallada con el fin de obtener un costo real para cada opción propuesta, debido a las variaciones en el refuerzo en flexión el costo entre un elemento y otro variaba considerablemente.

Se concluye que indiferentemente de las posibilidades propuestas, el caso tres es el más costoso económicamente, tanto por su configuración geométrica como por los materiales constructivos que lo constituyen; en óptimas condiciones difiere dependiendo de la combinación de cargas requerida desde un 25% (para caso 2, combinación de carga C.T.= 40 Kg/m², C.P.= 30 Kg/m², C.T.= 83,15 Kg/m²), hasta 229% (para caso 1, combinación de carga C.T.= 40 Kg/m², C.P.= 70 Kg/m², C.T.= 83,15 Kg/m²).

Los costos optimizados son positivos para las tres opciones planteadas, debido a que se logran reducir considerablemente los costos, desde 5% hasta 36% en los diferentes casos propuestos, siendo en óptimas condiciones el caso tres el de mayor costo económico y el caso uno el más económico; por otro lado, el caso dos se mantiene en medio de ambos, mostrándose, así como una posibilidad intermedia a escala de costos económicos.

En conclusión, se obtiene que el elemento propuesto en el caso tres tiene mejor desempeño estructural; sin embargo, es el más costoso económicamente; mientras el caso uno tiene un desempeño estructural medio en comparación con el dos y tres, además de ser el más económico. Esto expresa que el caso uno es la propuesta óptima para el sistema de soporte de techo en naves industriales de concreto prefabricado en Costa Rica.

Finalmente, se evalúan las opciones para la solución de cubierta de techo por utilizar en Costa Rica y se propone con forme a los requerimientos de distanciamiento entre largueros de tres metros mínimo y en condiciones de apoyo múltiple, para cubierta sencilla: el uso de lámina grapada con perfil de ancho 304 mm y peralte 105 mm o bien, canaleta estructural. Mientras que en el caso de que requiera cubierta compuesta: lámina con perfil ancho 502 mm y peralte 76mm, perfil ancho 457 mm y peralte 100 mm o lámina con perfil ancho 457 mm y peralte 113 mm; sin embargo, por recomendación de diferentes casas distribuidoras de láminas para techo es conveniente utilizar láminas con mayor holgura de distanciamiento entre largueros; por lo tanto, es mejor utilizar lámina grapada con perfil de ancho 304 mm y peralte 105 mm o canaleta estructural, las cuales pueden llegar a longitudes hasta de 3.5 metros.

Sin embargo, como recomendación dada por las diferentes casas distribuidoras de lámina de techo y profesionales experimentados en el tema, es conveniente utilizar láminas de techo que presenten holgura para tres metros de distanciamiento entre largueros, por lo que es conveniente el uso de lámina grapada con perfil de ancho 304 mm y peralte 105 mm o bien, canaleta estructural.

RECOMENDACIONES

Se recomienda para el caso del acero, hacer una optimización del espesor donde este sobrepase 2,37mm; lo anterior, debido al tema de la soldadura, ya que, de acuerdo con expertos en el sector de la construcción, cuando el espesor es superior a 2,37mm se vuelve complicado efectuar una buena soldadura en tubos de acero estructural. Asimismo, se recomienda a estudiantes, profesores y profesionales, el diseño y revisión detallada de la soldadura entre los elementos de acero estructural, la cual es una parte importante para el diseño de los casos propuestos y puede incrementar los costos de la estructura, pero se excluye de este estudio por no formar parte integral de él.

En el caso de que se utilice acero estructural tipo H.S.S. laminado en frío, este es de difícil acceso en Costa Rica y debe ser importado de países vecinos como México, en este caso se debe considerar un incremento aproximado de los costos del 50% adicional debido a transporte y logística.

Se recomienda al profesional calcular con detalle el valor económico del acero en el momento dado, ya que varían constantemente debido a los cambios en la moneda estadounidense, dólar, y con ello se genera un cambio en el costo del acero; el presente documento evalúa el coste más alto al que ha llegado el acero en Costa Rica, utilizando el valor en los costos calculados como conservadores.

Se sugiere a estudiantes en el caso de futuras investigaciones revisar la configuración geométrica, modificando dimensiones y geometría propia del elemento, con ello identificar si existen opciones de mejora para la propuesta del presente documento en cuanto a factores de esbeltez y modificación de la relación demanda – capacidad.

Para el caso de solución de cubierta de techo, se recomienda someter a análisis las opciones planteadas en cuanto a los valores requeridos por succión de viento, debido a que se excluyen de este estudio por no formar parte integral de él.

Se recomienda a estudiantes, profesores y profesionales la revisión detallada del presupuesto, pues se encuentra documentada la información con parámetros de diseño generalizados, cuya suposición es aceptable con bastante precisión; sin embargo, deben

contemplarse a detalle aspectos propios de la obra, tales como costos indirectos, imprevistos, tiempo de ejecución, producción, entre otras variables que pueden afectar los costos dados.

REFERENCIAS

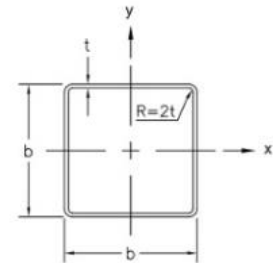
- American Institute of Steel. (2004). *Manual of the American Institute of Steel Construction* (Quinta ed.). Estados Unidos de América: Autor.
- Aceros Altamar. (15 de marzo de 2019). *Aceros Altamar*. Obtenido de <https://www.acerosaltamar.com/productos/H.S.S.-estructural>
- Alfaro, D. (2003). *Código urbano* (Novena ed.). San José, Costa Rica: Editorial Porvenir.
- Alfaro, J. P. (2015). *Diseño del sistema para ensayo de columnas y baldosas horizontales de concreto prefabricado*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- American Concrete Institute. (2002). *Requisitos esenciales para edificios de concreto reforzado*. Colombia: Imprelibros S.A.
- American Institute of Steel Construction. (2004). *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design*. Estados Unidos: Autor.
- American Institute of Steel Construction. (2005). *Specification for Structural Steel Buildings*. Estados Unidos: Autor .
- American Iron and Steel Institute. (2002). *AISI Manual, Cold-Formed Steel Design*. Estados Unidos: Computerized Structural Design. S.C.
- American Society of Civil Engineers. (2006). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures ASCE/SEI 7-05*. Estados Unidos de América : Autor .
- Arce, O., Murillo, M., & Lagos, R. (2018). *Manual Técnico PC* (Décimo Sexta ed.). San José, Costa Rica: Editorial TEC.
- Beer, F., Russell, J., & Dewolf, J. (2007). *Mecánica de materiales* (4ta ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2014). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- CSI Computers & Structures, INC. (2019, febrero 23). *CSI Computers & Structures, INC*. Retrieved from www.csiespana.com/software/2/sap2000
- Hoffmann, C., Sameh, A., & Grama, A. (2009). *Simulation and Validation of Structural Models*. Purdue University.
- Industrias Construtec S.A. (1 de junio de 2019). *Industrias Construtec S.A*. Obtenido de <http://www.construtec.cc/sobrenosotros.html>
- Ley de Construcciones y su Reglamento. (2009). *Ley de Construcciones y su Reglamento* (5ta ed.). Costa Rica: Editorial Investigaciones Jurídicas S.A.
- McCormac, J. (1996). *Diseño de Estructuras de Acero, Método LRFD*. México: Alfa y Omega Grupo Editor .

- McCormac, J., & Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado* (Octava ed.). México: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- McCormac, J., & Csernak, S. (2017). *Disño de estructuras de acero* (Quinta ed.). Ciudad México: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- METALCO. (09 de febrero de 2019). *Casa Distribuidora METALCO*. Obtenido de <https://www.metalco.net/productos/lamina-metalock/>
- Montero , J. I. (2019, enero 28). Construcción de naves industriales mantendrá dinamismo con inversión de transnacionales . *El Financiero*.
- Popov, E. P. (2000). *Mécanica de sólidos*. México: Pearson Educación.
- Quevedo, L. (2012). *Estudio sobre la simulación de eventos discretos (licenciatura)*. Universidad Católica Boliviana "San Pablo".
- Serviacero Comercial. (02 de 03 de 2019). *Serviacero Comercial*. Obtenido de <http://serviacero.com/serviacero/comercial/centro-de-distribucion-leon/>
- Sesión de Junta Directiva del INVU No. 4290. (1983, marzo 22). Reglamento de Construcciones.
- Ugalde, D. (2008). *Optimización de marcos y largueros en naves industriales de acero*. Informe de Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. México: McGraw-Hill.

ANEXOS

Anexo A

A = área de la sección	h = peralte de la sección
t = espesor de los perfiles	C_w = constante del alabeo de la sección
J = constante de la torsión de la sección (constante de St. Venant)	r_x = radio del giro de la sección con respecto al eje x
r_y = radio del giro de la sección con respecto al eje y	I_x = momento de inercia de la sección con respecto al eje x
I_y = momento de inercia de la sección con respecto al eje y	S_x = módulo elástico de la sección con respecto al eje x
H. G. = Hierro Galvanizado	H.N. = Laminado en caliente
Nota: Calculado según las expresiones dadas en el manual del AISI	



*Fig. A-1 Simbología catálogo Metalco tubo cuadrado de acero laminado en caliente.
Fuente: (METALCO, 2019)*

TUBERÍA ESTRUCTURAL CUADRADA EN HIERRO NEGRO Y GALVANIZADA (especificaciones técnicas y propiedades geométricas de las secciones)											
SECCIÓN	Largo (m)	b (cm)	t (cm)	A (cm ²)	F _y (Mpa)	I _x = I _y (cm ⁴)	S _x = S _y (cm ³)	r _x = r _y (cm)	Acabado y Peso (kg/unidad)		
									H.N.	H.G.	
50 X 50	1.20 mm	6	5.0	0.120	2.280	0	8.92	3.57	1.98	11.135	11.346
	1.50 mm		5.0	0.150	2.810	0	10.82	4.33	1.96	13.919	14.13
	1.80 mm		5.0	0.180	3.330	0	12.60	5.04	1.94	16.703	16.914
	2.37 mm		5.0	0.237	4.370	227	16.24	6.50	1.93	21.992	
	3.17 mm		5.0	0.317	5.506	227	19.15	7.66	1.86	28.972	
72 X 72	1.20 mm	6	7.2	0.120	3.340	0	27.60	7.67	2.88	15.891	16.192
	1.50 mm		7.2	0.150	4.130	0	33.80	9.39	2.86	19.864	20.165
	1.80 mm		7.2	0.180	4.915	0	39.75	11.04	2.84	23.837	24.138
	2.37 mm		7.2	0.237	6.442	227	51.39	14.28	2.82	31.385	
	3.17 mm		7.2	0.317	8.296	227	63.54	17.65	2.76	41.831	
91 X 91	1.50 mm	6	9.1	0.150	5.330	0	72.10	15.67	3.68	24.83	25.206
	1.80 mm		9.1	0.180	6.355	0	85.17	18.52	3.66	29.796	30.172
100 X 100	1.50 mm	6	10.0	0.150	5.813	227	93.18	18.63	4.36	27.418	27.834
	1.80 mm		10.0	0.180	6.931	227	110.21	22.04	3.98	32.902	33.317
	2.37 mm		10.0	0.237	9.050	227	141.65	28.33	3.95	43.32	
	3.17 mm		10.0	0.317	11.847	227	181.37	36.27	3.91	57.943	
	4.75 mm		10.0	0.475	17.129	227	250.44	50.08	3.82	86.38	
150 X 150	2.37 mm	6	15.0	0.237	13.810	227	496.92	66.26	5.99	65.754	
	3.17 mm		15.0	0.317	18.187	227	645.10	86.02	5.96	87.21	
	4.75 mm		15.0	0.475	26.629	227	917.40	122.32	5.86	129.792	
Nota: La fabricación especial se da en los productos de lista, en longitudes de 4 a 12 metros, cantidad mínima 20 unidades.											
Utilizar límite de fluencia F _{ya} , según la sección A7.2 de AISI con F _{xf} = 227 Mpa Límite de fluencia mínimo del acero virgen F _y = 227 MPA / Esfuerzo último mínimo de acero virgen F _u = 310 MPA											

*Fig. A-2 Tubería estructural cuadrada en hierro negro y galvanizada de la casa distribuidora Metalco de acero laminado en caliente.
Fuente: (METALCO, 2019)*

A = área de la sección	h = peralte de la sección
t = espesor de los perfiles	C_w = constante del alabeo de la sección
J = constante de la torsión de la sección (constante de St. Venant)	r_x = radio del giro de la sección con respecto al eje x
r_y = radio del giro de la sección con respecto al eje y	I_x = momento de inercia de la sección con respecto al eje x
I_y = momento de inercia de la sección con respecto al eje y	S_x = módulo elástico de la sección con respecto al eje x
H. G. = Hierro Galvanizado	H.N. = Laminado en caliente
Nota: Calculado según las expresiones dadas en el manual del AISI	

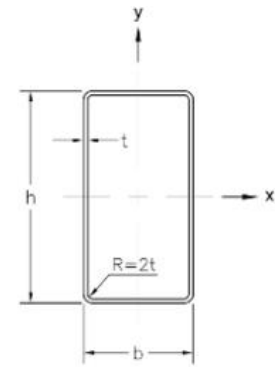


Fig. A-3 Simbología catálogo Metalco tubo rectangular de acero laminado en caliente.
Fuente: (METALCO, 2019)

TUBERÍA ESTRUCTURAL RECTANGULAR EN HIERRO NEGRO Y GALVANIZADA (especificaciones técnicas y propiedades geométricas de las secciones)																	
SECCIÓN	Largo (m)	h (cm)	b (cm)	t (cm)	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	S _x (cm ³)	r _x (cm)	I _y (cm ⁴)	S _y (cm ³)	r _y (cm)	C _w (cm ⁶)	J (cm ⁴)	Acabado			
														H.N.	H.G.		
23 x 96	1.50 mm	6	9.6	2.3	0.150	3.40	33.75	7.03	3.15	3.44	2.99	1.00	11.86	10.84	16.51		
	1.80 mm		9.6	2.3	0.180	4.06	39.70	8.27	3.12	3.99	3.47	0.99	13.81	12.71	19.81		
25 x 75	1.50 mm		7.5	2.5	0.150	2.81	18.11	4.82	2.53	3.22	2.58	1.07	4.77	9.41	13.92		
	1.80 mm		7.5	2.5	0.180	3.35	21.15	5.64	2.51	3.74	2.99	1.06	5.54	11.05	16.70		
38 x 50	1.80 mm		5.0	3.8	0.180	2.94	10.32	4.13	1.87	6.77	3.56	1.52	0.41	13.38	15.02		
38 x 75	1.50 mm		7.5	3.8	0.150	3.20	23.38	6.23	2.70	8.23	4.33	1.60	5.64	20.04	15.88		
	1.80 mm		7.5	3.8	0.180	3.80	27.30	7.28	2.68	27.30	5.04	1.59	6.61	23.64	19.05		
48 x 72	1.50 mm		7.2	4.8	0.150	3.41	24.86	6.91	2.70	13.41	5.41	1.98	3.36	28.13	16.51		
	1.80 mm		7.2	4.8	0.180	4.08	29.28	8.13	2.68	15.76	6.56	1.97	3.99	33.47	19.81		
	2.37 mm		7.2	4.8	0.237	5.24	36.63	10.17	2.64	19.67	8.19	1.93	5.04	42.76	26.08		
48 x 96	1.50 mm		9.6	4.8	0.150	4.13	50.04	10.43	3.48	17.30	7.21	2.46	19.91	41.81	19.86	20.17	
	1.80 mm		9.6	4.8	0.180	4.94	59.15	12.32	3.46	20.39	8.50	2.03	23.63	49.82	23.84	24.14	
	2.37 mm		9.6	4.8	0.237	6.38	74.63	15.54	3.42	25.62	10.67	2.00	29.90	63.81	31.39		
	3.17 mm		9.6	4.8	0.317	8.29	93.81	19.54	3.36	32.02	13.34	1.95	37.60	81.75	41.83		
50 x 150	1.50 mm		15.0	5.0	0.150	5.81	156.69	20.89	5.19	28.47	11.39	2.21	165.80	80.04	27.42	27.83	
	1.80 mm		15.0	5.0	0.180	6.97	186.24	24.83	5.17	33.70	13.48	2.20	197.02	95.48	32.90	33.32	
	2.37 mm		15.0	5.0	0.237	9.05	237.57	31.68	5.12	42.68	17.07	2.17	251.60	122.65	43.32		
	3.17 mm	15.0	5.0	0.317	11.85	303.38	40.45	5.06	53.97	21.59	2.13	319.70	157.91	57.94			
	4.75 mm	15.0	5.0	0.475	17.88	318.38	42.50	5.03	57.25	26.09	2.11	331.70	165.91	86.38			
50 x 200	2.37 mm	20.0	5.0	0.237	11.43	503.34	50.33	6.63	56.19	22.48	2.22	807.80	174.42	54.70			
	3.17 mm	20.0	5.0	0.317	15.02	647.81	64.78	6.57	71.38	28.55	2.18	1031.00	224.77	72.87			
100 x 150	2.37 mm	15.0	10.0	0.237	11.43	367.25	48.97	5.67	198.36	39.67	4.17	213.00	409.91	53.34			
	3.17 mm	15.0	10.0	0.317	15.02	474.27	63.24	5.62	255.71	51.14	4.13	279.00	536.97	72.87			
	4.75 mm	15.0	10.0	0.475	21.88	666.80	88.90	5.52	358.30	71.65	4.04	398.00	775.80	108.53			
100 x 200	2.37 mm	20.0	10.0	0.237	13.81	735.72	73.57	7.30	255.07	51.01	4.29	1263.00	606.67	65.75			
	3.17 mm	20.0	10.0	0.317	18.19	954.90	95.48	7.25	330.00	66.00	4.26	1650.00	796.30	87.21			
	4.75 mm	20.0	10.0	0.475	26.62	1356.60	135.66	7.13	466.10	93.22	4.18	2362.00	1157.00	129.79			

Nota: La fabricación especial se da en los productos de lista, en longitudes de 4 a 12 metros, cantidad mínima 20 unidades.

Fig. A-4 Tubería estructural cuadrada en hierro negro y galvanizado de la casa distribuidora Metalco en acero laminado en caliente.
Fuente: (METALCO, 2019)

HSS (PTR) Cuadrados Norma ASTM A500 GR B

Dimensiones y propiedades														
Dimensiones Nominales			Peso Kg/m	Espesor Real In.	b/t	h/t	Area cm ²	I	S	r	Z	Torsión		Area de sup. por ML
H In.	B In.	Espesor In.						I	S	r	Z	J	C	
4	4	1/2	32.20	0.465	5.60	5.60	38.84	495.32	97.18	3.56	120.61	874.09	183.54	0.37
		3/8	25.71	0.349	8.47	8.47	30.84	424.56	83.90	3.71	101.93	728.40	149.61	0.37
		5/16	22.07	0.291	10.8	10.8	26.39	379.60	74.73	3.78	89.80	636.83	129.46	0.38
		1/4	18.17	0.233	14.2	14.2	21.68	324.24	63.75	3.86	75.71	532.78	107.34	0.39
5	5	1/2	42.32	0.465	7.75	7.75	50.84	1078.04	170.43	4.60	208.12	1856.39	306.44	0.47
		3/8	33.30	0.349	11.3	11.3	39.87	903.22	141.91	4.75	170.43	1502.60	244.17	0.48
		5/16	28.40	0.291	14.2	14.2	33.94	790.84	124.54	4.83	148.14	1294.48	209.75	0.48
		1/4	23.25	0.233	18.5	18.5	27.68	665.97	104.88	4.90	123.39	1073.88	172.06	0.49
6	6	3/16	18.00	0.176	25.9	25.9	21.10	522.00	82.20	4.97	96.10	7810.00	132.00	0.49
		5/8	62.96	0.581	7.32	7.32	75.48	2289.27	299.88	5.51	371.99	3954.20	547.33	0.56
		3/8	40.90	0.349	14.2	14.2	48.84	1639.95	214.67	5.79	255.64	2688.86	362.15	0.58
		1/2	52.46	0.465	9.90	9.90	62.84	2006.24	263.83	5.64	319.55	3375.64	460.48	0.57
		5/16	34.74	0.291	17.6	17.6	41.42	1427.67	186.81	5.87	221.23	2305.92	309.72	0.59
		1/4	28.31	0.233	22.8	22.8	33.68	1190.42	156.00	5.94	181.90	1893.85	252.36	0.59
8	8	3/16	21.80	0.214	31.6	31.6	25.50	923.0	121.00	6.01	141.0	1456.81	192.00	0.59
		5/8	88.30	0.581	10.8	10.8	105.81	6076.98	598.13	7.59	724.31	10156.05	1035.66	0.76
		1/2	72.71	0.465	14.2	14.2	87.10	5202.89	509.64	7.72	607.96	8491.12	858.68	0.77
		3/8	56.10	0.349	19.9	19.9	67.10	4141.50	408.04	7.87	478.50	6659.70	666.95	0.78
		5/16	47.39	0.291	24.5	24.5	56.39	3558.78	350.68	7.95	409.68	5660.75	565.35	0.79
		1/4	38.43	0.233	31.4	31.4	45.68	2934.43	288.41	8.03	334.30	4620.17	458.84	0.79
10	10	3/16	29.40	0.289	43.2	43.2	34.50	2260.00	222.00	8.09	256.00	3521.32	347.00	0.80
		5/8	113.62	0.581	14.2	14.2	135.48	12653.44	996.33	9.65	1191.34	20728.32	1671.48	0.97
		1/2	92.97	0.465	18.5	18.5	110.97	10655.52	839.02	9.80	989.78	17148.73	1379.79	0.98
		3/8	71.30	0.349	25.7	25.7	85.16	8407.87	660.40	9.96	770.19	13277.78	1061.88	0.98
		5/16	60.06	0.291	31.4	31.4	71.61	7159.18	563.72	10.01	653.84	11238.25	896.37	0.99
		1/4	48.57	0.233	40.0	40.0	57.68	5868.86	462.12	10.08	532.58	9157.09	725.95	1.00
12	12	3/16	37.10	0.364	54.7	54.7	43.40	4480.00	353.00	10.20	405.00	6951.06	548.00	1.00
		5/8	138.94	0.581	17.6	17.6	165.81	22809.48	1497.78	11.73	1769.80	36878.10	2474.45	1.17
		1/2	113.23	0.465	22.8	22.8	134.84	19021.78	1248.69	11.89	1461.73	30301.65	2015.61	1.18
		3/8	86.48	0.349	31.4	31.4	102.58	14859.46	975.03	12.01	1130.71	23350.58	1548.58	1.19
		5/16	72.73	0.291	38.3	38.3	86.45	12653.44	829.19	12.09	957.00	19687.75	1304.41	1.19
		1/4	58.69	0.233	48.6	48.6	69.68	10322.54	676.79	12.17	776.75	15941.66	1053.69	1.20
14	14	1/2	133.50	0.465	27.1	27.1	159.00	30900.00	1740.00	14.00	2030.00	46300.00	2780.00	1.38
		3/8	101.40	0.349	37.0	37.0	121.00	24100.00	1360.00	14.10	1570.00	36100.00	2140.00	1.39
		5/16	85.00	0.291	45.1	45.1	102.00	20400.00	1150.00	14.20	1320.00	30600.00	1790.00	1.40
16	16	1/2	153.70	1.508	31.4	31.4	183.00	46900.00	2310.00	16.00	2680.00	70300.00	3670.00	1.59
		3/8	116.60	1.143	42.7	42.7	139.00	36500.00	1790.00	16.20	2070.00	54700.00	2810.00	1.60
		5/16	97.60	0.957	51.9	51.9	117.00	30800.00	1510.00	16.20	1740.00	46100.00	2350.00	1.60

Fig. A-5 Tubería estructural H.S.S. cuadrada de acero laminado en frío.
Fuente: (Serviacero Comercial, 2019)

HSS (PTR) Rectangulares Norma ASTM A500 GR B

Dimensiones y propiedades																			
Dimensiones Nominadas			Peso Kg/m	Espesor Real In.	b/t	h/t	Area cm ²	Eje X-X					Eje Y-Y				Torsión		Area de sup. por ML mt ²
H In.	B In.	Espesor In.						I cm ⁴	S cm ³	r cm	Z cm ³	I cm ⁴	S cm ³	r cm	Z cm ³	J cm ⁴	C cm ³		
5	3	1/4	18.3	0.179	9.90	18.5	21.70	445	70.1	4.53	88.0	200	52.4	3.03	61.6	457.85	100	0.39	
		3/16	14.1	0.139	14.30	25.9	16.60	354	55.7	4.61	68.7	160	41.9	3.10	48.3	360.45	77.1	0.39	
6	4	1/2	42.27	0.465	5.60	9.9	50.84	1411.02	185.17	5.26	234.34	736.73	145.19	3.81	175.34	1677.41	291.69	0.47	
		3/8	33.34	0.349	8.47	14.2	39.87	1177.93	154.37	5.44	191.73	620.18	122.08	3.94	143.55	1365.24	232.70	0.48	
		5/16	28.3	0.277	10.7	17.6	34.00	1030.00	136.00	5.51	169.00	548.00	108.00	4.01	127.00	1070.00	201.00	0.48	
		1/4	23.22	0.233	14.2	22.8	27.68	865.76	113.73	5.59	138.47	462.02	90.78	4.09	104.55	978.14	165.51	0.49	
8	3	3/16	18.0	0.176	20.10	31.6	21.10	679	89.1	5.67	108	363	71.5	4.15	81.6	761.71	126	0.49	
		1/4	26.00	0.233	9.90	31.4	30.70	1470.00	145.00	6.93	188.00	311.00	81.60	3.18	93.20	865.76	163.00	0.54	
8	4	3/16	28.3	0.277	10.7	17.6	34.00	1030.00	136.00	7.03	145.00	246.00	64.60	3.25	72.30	640.00	125.00	0.54	
		1/2	52.40	0.465	5.60	14.2	62.84	2984.38	293.33	6.88	378.54	982.31	193.37	3.96	227.78	2543.17	399.84	0.57	
		3/8	40.93	0.349	8.47	19.9	48.84	2439.12	240.89	7.06	304.80	815.81	160.27	4.09	185.17	2052.02	316.27	0.58	
8	6	1/4	28.28	0.233	14.2	31.4	33.68	1768.98	173.70	7.24	216.31	599.37	117.99	4.22	133.23	1465.13	222.86	0.59	
		1/2	62.52	0.465	9.90	14.2	74.84	4083.23	401.48	7.39	493.25	2601.45	340.85	5.89	403.12	5286.14	629.26	0.67	
		3/8	48.53	0.349	14.2	19.9	57.87	3292.39	324.46	7.54	391.65	2106.13	276.94	6.02	321.19	4162.31	491.61	0.68	
		1/4	33.34	0.233	22.8	31.4	39.68	2351.71	231.06	7.70	275.30	1510.92	198.28	6.17	226.14	2921.94	340.85	0.69	
10	4	3/16	25.60	0.251	31.6	43.2	30.00	1810.00	178.00	7.77	211.00	1170.00	153.00	6.24	174.00	2239.33	259.00	0.70	
		1/4	48.53	0.349	4.47	25.7	57.87	4328.81	340.85	8.66	439.17	1007.28	198.28	4.17	227.78	2767.94	399.84	0.68	
10	6	3/8	33.34	0.233	14.2	40.0	39.68	3100.92	244.17	8.84	309.72	736.73	145.03	4.32	161.90	1968.77	280.22	0.69	
		1/2	72.79	0.465	9.90	18.5	87.10	7117.56	562.08	9.07	699.73	3192.50	419.51	6.07	488.33	7325.67	798.05	0.77	
		3/8	56.12	0.349	14.2	25.7	67.10	5702.37	447.37	9.22	550.61	2568.15	337.57	6.20	385.10	5743.99	621.07	0.78	
10	8	1/4	38.40	0.233	22.8	40.0	45.68	4024.96	316.27	9.37	383.46	1831.42	240.89	6.32	270.39	4016.63	427.70	0.79	
		1/2	82.91	0.465	14.2	18.5	98.71	8907.35	699.73	9.47	843.93	6285.09	617.79	7.98	722.67	11987.47	1088.10	0.87	
		3/8	63.71	0.349	19.9	25.7	76.13	7034.31	553.88	9.63	660.4	4994.78	491.61	8.10	566.99	9323.58	840.66	0.88	
		1/4	43.46	0.233	31.4	40.0	51.68	4953.15	390.01	9.78	458.84	3521.32	345.77	8.26	393.29	6451.59	576.82	0.89	
12	6	1/2	82.91	0.465	9.90	22.8	98.71	11279.87	740.70	10.69	934.06	3787.71	496.53	6.20	571.91	9448.45	966.84	0.87	
		3/8	63.71	0.349	14.2	31.4	76.13	8948.98	586.66	10.87	730.86	3034.33	398.21	6.32	450.64	7408.92	750.53	0.88	
		1/4	43.46	0.233	22.8	48.6	51.68	6285.09	412.95	11.02	508.00	2156.08	283.50	6.45	314.64	5161.27	516.19	0.89	
12	8	1/2	93.03	0.465	4.47	22.8	110.97	13860.51	909.48	11.18	1111.04	7367.30	727.59	8.15	839.02	15691.92	1317.52	0.98	
		3/8	71.30	0.349	19.9	31.4	85.16	10905.26	716.11	11.35	865.24	5827.24	575.19	8.31	653.84	12153.96	1016.00	0.98	
14	6	1/4	48.53	0.233	31.4	48.6	57.68	7617.04	501.44	11.51	598.13	4104.04	403.12	8.43	453.92	8407.87	696.45	1.00	
		1/2	93.03	0.465	9.90	27.1	110.97	16732.50	940.62	12.29	1201.17	4370.43	575.19	6.30	655.48	11612.86	1135.62	0.98	
		3/8	71.30	0.349	14.2	37.1	85.16	13194.54	740.70	12.47	935.70	3496.34	458.84	6.43	514.55	9115.47	878.35	0.98	
16	8	1/4	48.53	0.233	22.8	57.2	57.68	9240.34	519.47	12.65	647.29	2476.58	324.46	6.55	358.88	6326.72	604.68	1.00	
		1/2	113.28	0.465	14.2	31.4	134.84	28262.11	1391.26	14.48	1737.03	9573.32	943.89	8.43	1068.44	23433.83	1769.80	1.18	
16	8	3/8	86.48	0.349	19.9	42.9	102.58	22060.27	1086.46	14.66	1340.46	7533.79	742.33	8.56	829.19	18147.69	1366.68	1.19	
		1/4	58.65	0.233	31.4	65.8	69.68	15317.32	753.80	14.81	920.95	5286.14	519.47	8.69	571.91	12486.94	932.42	1.20	

Fig. A-6 Tubería estructural H.S.S. rectangular de acero laminado en frío.
Fuente: (Serviacero Comercial, 2019)

Anexo B

Presupuesto para una losa de concreto 12 m de longitud y varillas # 5 @ 15 cm ambas direcciones									
Losa reforzada	0,22	m3	M.Obra	Materiales	Subcont.	M.Obra	Materiales	Subcont.	TOTAL
Cantidad	1,00	un							
Largo	12,00	m							
Alto	0,06	m							
Ancho	0,30	m							
Desperdicio	1,10	%							
Encofrado doble uso	1,78	m2							
Tabla 1x12" s/c de 4 varas	2,00	un		€5.500,00		€0,00	€11.000,00	€0,00	€11.000,00
Regla de 1"x3"x 4varas s/c	2,00	un		€1.390,09		€0,00	€2.780,18	€0,00	€2.780,18
Clavos 63mm	1,00	kg		€845,45		€0,00	€845,45	€0,00	€845,45
Mano de Obra colocación de formaletas	1,78	m2	€3.500,00			€6.216,00	€0,00	€0,00	€6.216,00
Concreto 210 Kg/cm2	0,24	m3							
Concreto premezclado 210kg/cm²	0,24	m³		€78.000,00		€0,00	€18.532,80	€0,00	€18.532,80
Bombeo de concreto premezclado	0,24	m3		€10.000,00		€0,00	€2.376,00	€0,00	€2.376,00
Mano de obra colocación de concreto premezclado	0,24	M3	€12.000,00			€2.851,20	€0,00	€0,00	€2.851,20
Acero									
Varilla #5 deformada gr 60	16,00	un		€5.800,00		€0,00	€92.800,00	€0,00	€92.800,00
Alambre negro # 16	11,92	kg		€980,00		€0,00	€11.680,97	€0,00	€11.680,97
Mano de Obra armadura	148,99	kg	€320,00			€47.677,44	€0,00	€0,00	€47.677,44
Costo unitarios colones					Total	€56.744,64	€140.015,40	€0,00	€196.760,04
Tipo de cambio					Total	€600,00	€600,00	€600,00	€600,00
Costo unitarios dólares					Total	\$94,57	\$233,36	\$0,00	\$327,93

Fig. B- 1 Presupuesto para una losa de concreto reforzada, 12 m de longitud y varilla # 5 @ 15 cm en ambas direcciones.

Fuente: Propia

Presupuesto para una losa de concreto 14 m de longitud y varillas # 5 @ 15 cm ambas direcciones									
Losa reforzada	0,25	m3	M.Obra	Materiales	Subcont.	M.Obra	Materiales	Subcont.	TOTAL
Cantidad	1,00	un							
Largo	14,00	m							
Alto	0,06	m							
Ancho	0,30	m							
Desperdicio	1,10	%							
Encofrado doble uso	2,02	m2							
Tabla 1x12" s/c de 4 varas	2,00	un		€5.500,00		€0,00	€11.000,00	€0,00	€11.000,00
Regla de 1"x3"x 4varas s/c	2,00	un		€1.390,09		€0,00	€2.780,18	€0,00	€2.780,18
Clavos 63mm	1,00	kg		€845,45		€0,00	€845,45	€0,00	€845,45
Mano de Obra colocación de formaletas	2,02	m2	€3.500,00			€7.056,00	€0,00	€0,00	€7.056,00
Concreto 210 Kg/cm2	0,28	m3							
Concreto premezclado 210kg/cm ²	0,28	m ³		€78.000,00		€0,00	€21.621,60	€0,00	€21.621,60
Bombeo de concreto premezclado	0,28	m3		€10.000,00		€0,00	€2.772,00	€0,00	€2.772,00
Mano de obra colocación de concreto premezclado	0,28	M3	€12.000,00			€3.326,40	€0,00	€0,00	€3.326,40
Acero									
Varilla #5 deformada gr 60	19,00	un		€5.800,00		€0,00	€110.200,00	€0,00	€110.200,00
Alambre negro # 16	14,15	kg		€980,00		€0,00	€13.871,16	€0,00	€13.871,16
Mano de Obra armadura	176,93	kg	€320,00			€56.616,96	€0,00	€0,00	€56.616,96
Costo unitarios colones					Total	€66.999,36	€163.090,38	€0,00	€230.089,74
Tipo de cambio					Total	€600,00	€600,00	€600,00	€600,00
Costo unitarios dólares					Total	\$111,67	\$271,82	\$0,00	\$383,48

Fig. B- 2 Presupuesto para una losa de concreto reforzada, 14 m de longitud y varilla # 5 @ 15 cm en ambas direcciones.

Fuente: Propia

Presupuesto para una losa de concreto 12 m de longitud y varillas # 6 @ 15 cm ambas direcciones									
Losa reforzada	0,22	m3	M.Obra	Materiales	Subcont.	M.Obra	Materiales	Subcont.	TOTAL
Cantidad	1,00	un							
Largo	12,00	m							
Alto	0,06	m							
Ancho	0,30	m							
Desperdicio	1,10	%							
Encofrado doble uso	1,78	m2							
Tabla 1x12" s/c de 4 varas	2,00	un		€5.500,00		€0,00	€11.000,00	€0,00	€11.000,00
Regla de 1"x3"x 4varas s/c	2,00	un		€1.390,09		€0,00	€2.780,18	€0,00	€2.780,18
Clavos 63mm	1,00	kg		€845,45		€0,00	€845,45	€0,00	€845,45
Mano de Obra colocación de formaletas	1,78	m2	€3.500,00			€6.216,00	€0,00	€0,00	€6.216,00
Concreto 210 Kg/cm2	0,24	m3							
Concreto premezclado 210kg/cm ²	0,24	m ³		€78.000,00		€0,00	€18.532,80	€0,00	€18.532,80
Bombeo de concreto premezclado	0,24	m3		€10.000,00		€0,00	€2.376,00	€0,00	€2.376,00
Mano de obra colocación de concreto premezclado	0,24	M3	€12.000,00			€2.851,20	€0,00	€0,00	€2.851,20
Acero									
Varilla #5 deformada gr 60		un		€5.800,00		€0,00	€0,00	€0,00	€0,00
Alambre negro # 16	18,24	kg		€980,00		€0,00	€17.872,85	€0,00	€17.872,85
Mano de Obra armadura	227,97	kg	€320,00			€72.950,40	€0,00	€0,00	€72.950,40
Costo unitarios colones					Total	€82.017,60	€232.757,27	€0,00	€314.774,87
Tipo de cambio					Total	€600,00	€600,00	€600,00	€600,00
Costo unitarios dólares					Total	\$136,70	\$387,93	\$0,00	\$524,62

Fig. B- 3 Presupuesto para una losa de concreto reforzada, 12 m de longitud y varilla # 6 @ 15 cm en ambas direcciones.

Fuente: Propia

Presupuesto para una losa de concreto 14 m de longitud y varillas # 6 @ 15 cm ambas direcciones									
Losa reforzada	0,25	m3	M.Obra	Materiales	Subcont.	M.Obra	Materiales	Subcont.	TOTAL
Cantidad	1,00	un							
Largo	14,00	m							
Alto	0,06	m							
Ancho	0,30	m							
Desperdicio	1,10	%							
Encofrado doble uso	2,02	m2							
Tabla 1x12" s/c de 4 varas	2,00	un		€5.500,00		€0,00	€11.000,00	€0,00	€11.000,00
Regla de 1"x3"x 4varas s/c	2,00	un		€1.390,09		€0,00	€2.780,18	€0,00	€2.780,18
Clavos 63mm	1,00	kg		€845,45		€0,00	€845,45	€0,00	€845,45
Mano de Obra colocación de formaletas	2,02	m2	€3.500,00			€7.056,00	€0,00	€0,00	€7.056,00
Concreto 210 Kg/cm2	0,28	m3							
Concreto premezclado 210kg/cm ²	0,28	m ³		€78.000,00		€0,00	€21.621,60	€0,00	€21.621,60
Bombeo de concreto premezclado	0,28	m3		€10.000,00		€0,00	€2.772,00	€0,00	€2.772,00
Mano de obra colocación de concreto premezclado	0,28	M3	€12.000,00			€3.326,40	€0,00	€0,00	€3.326,40
Acero									
Varilla #5 deformada gr 60		un		€5.800,00		€0,00	€0,00	€0,00	€0,00
Alambre negro # 16	21,46	kg		€980,00		€0,00	€21.026,88	€0,00	€21.026,88
Mano de Obra armadura	268,20	kg	€320,00			€85.824,00	€0,00	€0,00	€85.824,00
Costo unitarios colones					Total	€96.206,40	€271.046,10	€0,00	€367.252,50
Tipo de cambio					Total	€600,00	€600,00	€600,00	€600,00
Costo unitarios dólares					Total	\$160,34	\$451,74	\$0,00	\$612,09

Fig. B- 4 Presupuesto para una losa de concreto reforzada, 14 m de longitud y varilla # 6 @ 15 cm en ambas direcciones.

Fuente: Propia

Presupuesto para una losa de concreto 16 m de longitud y varillas # 6 @ 15 cm ambas direcciones									
Losa reforzada	0,29	m3	M.Obra	Materiales	Subcont.	M.Obra	Materiales	Subcont.	TOTAL
Cantidad	1,00	un							
Largo	16,00	m							
Alto	0,06	m							
Ancho	0,30	m							
Desperdicio	1,10	%							
Encofrado doble uso	2,26	m2							
Tabla 1x12" s/c de 4 varas	2,00	un		€5.500,00		€0,00	€11.000,00	€0,00	€11.000,00
Regla de 1"x3"x 4varas s/c	2,00	un		€1.390,09		€0,00	€2.780,18	€0,00	€2.780,18
Clavos 63mm	1,00	kg		€845,45		€0,00	€845,45	€0,00	€845,45
Mano de Obra colocación de formaletas	2,26	m2	€3.500,00			€7.896,00	€0,00	€0,00	€7.896,00
Concreto 210 Kg/cm2	0,32	m3							
Concreto premezclado 210kg/cm²	0,32	m³		€78.000,00		€0,00	€24.710,40	€0,00	€24.710,40
Bombeo de concreto premezclado	0,32	m3		€10.000,00		€0,00	€3.168,00	€0,00	€3.168,00
Mano de obra colocación de concreto premezclado	0,32	M3	€12.000,00			€3.801,60	€0,00	€0,00	€3.801,60
Acero									
Varilla #5 deformada gr 60		un		€5.800,00		€0,00	€0,00	€0,00	€0,00
Alambre negro # 16	24,67	kg		€980,00		€0,00	€24.180,91	€0,00	€24.180,91
Mano de Obra armadura	308,43	kg	€320,00			€98.697,60	€0,00	€0,00	€98.697,60
Costo unitarios colones					Total	€110.395,20	€309.334,93	€0,00	€419.730,13
Tipo de cambio					Total	€600,00	€600,00	€600,00	€600,00
Costo unitarios dólares					Total	\$183,99	\$515,56	\$0,00	\$699,55

Fig. B- 5 Presupuesto para una losa de concreto reforzada, 16 m de longitud y varilla # 6 @ 15 cm en ambas direcciones.

Fuente: Propia

Presupuesto para una losa de concreto 16 m de longitud y varillas # 7 @ 15 cm ambas direcciones									
Losa reforzada	0,29	m3	M.Obra	Materiales	Subcont.	M.Obra	Materiales	Subcont.	TOTAL
Cantidad	1,00	un							
Largo	16,00	m							
Alto	0,06	m							
Ancho	0,30	m							
Desperdicio	1,10	%							
Encofrado doble uso	2,26	m2							
Tabla 1x12" s/c de 4 varas	2,00	un		€5.500,00		€0,00	€11.000,00	€0,00	€11.000,00
Regla de 1"x3"x 4varas s/c	2,00	un		€1.390,09		€0,00	€2.780,18	€0,00	€2.780,18
Clavos 63mm	1,00	kg		€845,45		€0,00	€845,45	€0,00	€845,45
Mano de Obra colocación de formaletas	2,26	m2	€3.500,00			€7.896,00	€0,00	€0,00	€7.896,00
Concreto 210 Kg/cm2	0,32	m3							
Concreto premezclado 210kg/cm ²	0,32	m ³		€78.000,00		€0,00	€24.710,40	€0,00	€24.710,40
Bombeo de concreto premezclado	0,32	m3		€10.000,00		€0,00	€3.168,00	€0,00	€3.168,00
Mano de obra colocación de concreto premezclado	0,32	M3	€12.000,00			€3.801,60	€0,00	€0,00	€3.801,60
Acero									
Varilla #5 deformada gr 60		un		€5.800,00		€0,00	€0,00	€0,00	€0,00
Alambre negro # 16	35,04	kg		€980,00		€0,00	€34.342,96	€0,00	€34.342,96
Mano de Obra armadura	438,05	kg	€320,00			€140.175,36	€0,00	€0,00	€140.175,36
Costo unitarios colones					Total	€151.872,96	€456.046,99	€0,00	€607.919,95
Tipo de cambio					Total	€600,00	€600,00	€600,00	€600,00
Costo unitarios dólares					Total	\$253,12	\$760,08	\$0,00	\$1.013,20

Fig. B- 6 Presupuesto para una losa de concreto reforzada, 16 m de longitud y varilla # 7 @ 15 cm en ambas direcciones.

Fuente: Propia

