

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA CUBIERTA DEL PROYECTO DE VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL ARRAYANES DE SAN SEBASTIÁN

Trabajo de grado

Para obtener el título de ingeniería civil

Presentado por:

Junior Muñoz Giraldo

Juanita Escobar Sánchez

Asesora:

Claudia Patricia Parra Medina

Universidad Católica Luis Amigó

Medellín, 2024

Contenido

INTRODUCCION	7
OBETIVOS	7
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVO ESPECÍFICOS	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
JUSTIFICACIÓN	10
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO ARRAYANES DE SAN SEBASTIÁN	11
NORMAS APLICADAS	13
MATERIALES Y PROPIEDADES MECÁNICAS.	13
CARGAS EVALUADAS.	14
ALCANCE	14
MARCO TEÓRICO	15
OPTIMIZACIÓN DE DISEÑOS ESTRUCTURALES DE CUBIERTAS METÁLICAS	15
PARÁMETROS DE DISEÑO ESTRUCTURAL	17
CARGAS (FUERZAS ACTUANTES).....	17
CARGA MUERTA [D].....	17
CARGA VIVA [L].	18
CARGA DE ACUMULACIÓN DE NIEVE Y/O GRANIZO:.....	19
CARGAS DE VIENTO [W].....	19
CARGA SÍSMICA:.....	20
PERIODOS DEL ESPECTRO DE RESPUESTA	20
MATERIALES	22
ESTABILIDAD	22
RESISTENCIA Y SEGURIDAD	22
RIGIDEZ	23
DURABILIDAD.....	23
FUNCIONALIDAD Y ESTÉTICA	23
OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS	23
MÉTODO DE DISEÑO PARAMÉTRICO:	23
SIMULACIÓN CON SOFTWARE SAP2000.....	24
METODOLOGÍA:	25
En el presente trabajo se llevará a cabo la siguiente metodología:	25

ANALISIS DE CARGAS EN EL NUEVO DISEÑO	26
CARGA MUERTA	26
CARGA VIVA	27
CARGA DE GRANIZO.....	27
CARGA DE VIENTO	27
RESULTADOS.....	32
PROPUESTA DE DISEÑO SIMULACIÓN:.....	33
SIMULACIÓN EN SAP.....	35
ANÁLISIS DE COSTOS	45
PESO DE LA ESTRUCTURA	45
SECCIONES A RECUBRIR DE PINTURA	45
FABRICACION EN PLANTA	47
COSTO DE INSUMO DE SOLDADURA	50
REDUCCION DE COSTO	51
CONCLUSIONES:.....	52
REFERENCIAS.....	53

Lista de Figuras

Figura 1 vista en planta del sistema estructural de cubierta Arrayanes de San Sebastián. .	12
Figura 2 Teja Standing Seam.....	27
Figura 4 Velocidad del viento por Regiones.	30
Figura 3 Ubicación de la Ceja en el mapa de Colombia.....	30
Figura 5 división de la cubierta en 4 partes.....	33
Figura 6. Sección transversal de la cubierta	34
Figura 7. Vista en planta de la cuarta parte de la cubierta.....	34
Figura 8. GRID o grilla	35
Figura 9 Definición de los elementos que componen el diseño.....	35
Figura 10 Asignación de los materiales	36
Figura 11 Asignación de los materiales	36
Figura 12 Definir los elementos y sección de cada uno de los elementos.....	37
Figura 13 Ubicación de los elementos en la cubierta.....	38
Figura 14 Definición de la carga sísmica.....	38
Figura 15 Definición de las cargas analizadas.....	39
Figura 16 Cargas distribuidas sobre el área de la cubierta.....	39
Figura 17 Asignación de las cargas analizadas.....	40
Figura 18. Designación de Combinaciones de cargas.....	41
Figura 19. Desplazamiento en el eje Z.....	42
Figura 20. Cargas axiales de la cuarta parte de la cubierta	43
Figura 21. Cortante de diseño.....	43
Figura 22. Momentos de diseño.....	44
Figura 23. Reacciones del diseño en sus apoyos.....	44
Figura 24. Precio de anticorrosivo epoxico.....	46
Figura 25. Precio de acabado acrílica mantenimiento.....	46

Lista de Tablas

Tabla 1 cantidad de materiales por 1 torre.	12
Tabla 2 especificación de los materiales Fuente: Manual de la AISC, Tabla 2-4, p. 2-48....	13
Tabla 3 cargas evaluadas.	14
<i>Tabla 4. unidades de peso de materiales de construcción</i>	17
Tabla 5 Carga viva de cubierta.	18
Tabla 6 Aceleración horizontal para sismo según su ubicación.	20
Tabla 7 Valores de Fa para zona de periodos cortos del espectro. Fuente tomada de la norma NSR-10 Título A.....	21
Tabla 8 Valores Fv para zona de periodos intermedios del espectro. Fuente tomada de la norma NSR-10 Titulo A	21
Tabla 9 coeficiente de exposición para la presión dinámica Kz. Fuente tomada de la NSR-10 título B.	28
Tabla 10 Factor de direccionalidad del viento Fuente tomada de la Norma NSR-10 Titulo B	29
Tabla 11 Valor de coeficiente de importancia. Fuente tomado de la Norma NSR-10 Titulo A.	30
Tabla 12 Coeficiente de presión interna, Fuente tomado de la Norma NSR-10 Titulo B.	31
Tabla 13 Coeficiente de presión externa. Fuente tomado de la Norma NSR-10 Titulo B.	31
Tabla 14 Valores sean la dirección del viento para Cp.	31
Tabla 15 presión del viento.	32
Tabla 16 combinaciones de carga para deflexiones.	40
Tabla 17 combinaciones de carga para esfuerzos.	41
Tabla 18 valores de perfil y tubería	45
Tabla 19 Valores de pintura para cada diseño.	46
Tabla 20 Personal por tiempo de producción.	47
Tabla 21 Costo de mano de obra proceso diseño inicial.	48
Tabla 22 personal y tiempo de montaje.	49
Tabla 23 Costo de montaje	49
Tabla 24 Costo de flete.	50
Tabla 25 ahorro en transporte.....	50
Tabla 26 Costo insumos de soldadura.	51
Tabla 27 Tabla comparativa entre diseño inicial y el diseño propuesto..	51

RESUMEN

El presente trabajo analiza de forma comparativa los costos asociados a la optimización del proyecto de vivienda de interés social **Arrayanes de San Sebastián**, compuesto por 11 torres de 5 pisos cada una. El objetivo principal es optimizar el diseño estructural de la cubierta mediante un enfoque de diseño paramétrico, considerando tres variables clave: la geometría de la estructura, los materiales utilizados y la reducción de peso, todo ello sin comprometer su resistencia, durabilidad ni estabilidad.

En esta propuesta, se plantea un cambio en los materiales de las vigas principales. El diseño inicial utiliza perfiles PHR de 203x67x1.5 mm, mientras que el diseño optimizado propone perfiles de 120x60x2 mm. Esta optimización es factible debido a una falta de comunicación en la etapa inicial entre el equipo de obra civil y el ingeniero estructural, quienes no consideraron un muro de mampostería que atraviesa la estructura metálica y que podría haber sido empleado como apoyo.

Además de la reducción de costos, el proyecto aborda otros aspectos clave, como el impacto ambiental. A lo largo del proceso, se identificaron oportunidades para minimizar agentes contaminantes, como los gases de efecto invernadero, contribuyendo a una construcción más sostenible.

Mediante el uso del software de modelado estructural SAP2000, se simuló el comportamiento de la estructura metálica modificada bajo cargas estáticas y dinámicas, con el fin de evaluar la viabilidad del diseño propuesto. Los resultados finales muestran un ahorro significativo en costos, confirmando la efectividad de las mejoras planteadas. una mejora integral en eficiencia y sostenibilidad.

INTRODUCCION

Este trabajo se realizó aprovechando la proximidad del proyecto de vivienda de interés social **Arrayanes de San Sebastián**, en el cual participamos activamente en su producción y montaje, colaborando con la empresa constructora. Nuestro objetivo fue proponer una optimización con un enfoque de diseño paramétrico, modificando tres parámetros clave: los materiales de las vigas principales, su geometría y la reducción de peso. Estas modificaciones buscan alcanzar una optimización integral sin comprometer la funcionalidad, durabilidad ni resistencia de las 11 torres involucradas.

La motivación para elegir como tema de nuestro trabajo de grado la cubierta metálica de **Arrayanes de San Sebastián** surge de nuestra participación directa en su producción. Durante este proceso, identificamos oportunidades de mejora que no solo reducirían costos, sino que también optimizarían otros aspectos, como el uso eficiente de materiales y recursos, así como los procesos de fabricación y montaje.

A lo largo de este documento, se detallará cómo se logró esta optimización mediante el respaldo de un software de modelado, demostrando su viabilidad y los beneficios alcanzados en términos constructivos y económicos.

OBETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Mejorar el diseño estructural de la cubierta del proyecto de vivienda de interés social Arrayanes de San Sebastián sin comprometer su funcionalidad, resistencia y durabilidad.

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Revisar el estado del arte sobre la optimización de diseños estructurales de cubiertas metálicas, identificando las metodologías y tecnologías más avanzadas utilizadas en la mejora de su rendimiento y eficiencia.

- Evaluar el diseño estructural actual de la cubierta en el proyecto de vivienda de interés social "Arrayanes de San Sebastián", identificando puntos críticos y áreas de mejora, y calcular las cargas estructurales (estáticas y dinámicas) que actúan sobre la cubierta.
- Aplicar el método de diseño paramétrico para analizar el diseño de la cubierta, proponiendo modificaciones en la geometría y selección de materiales con el fin de mejorar la eficiencia y resistencia de la estructura metálica.
- Simular la estructura metálica modificada utilizando el software SAP2000, evaluando su comportamiento bajo las cargas estáticas y dinámicas, con el objetivo de verificar la viabilidad del diseño propuesto.
- Realizar un análisis comparativo de costos entre el diseño estructural original y el propuesto, evaluando la viabilidad económica de las modificaciones en términos de costos de materiales, mano de obra y mantenimiento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proyecto de vivienda de interés social "Arrayanes de San Sebastián" enfrenta un desafío crítico en el diseño estructural de la cubierta del último piso, el cual es fundamental abordar para garantizar el éxito del proyecto y el cumplimiento de sus objetivos. Este problema surge como consecuencia de modificaciones en la obra civil que no fueron contempladas en el diseño inicial de la cubierta metálica. Específicamente, la inclusión de elementos de mampostería (denominados "cuchillas") ha llevado a un sobredimensionamiento del diseño estructural, lo que resulta en un uso excesivo e ineficiente de los materiales.

La construcción de viviendas de interés social tiene como objetivo proporcionar soluciones habitacionales accesibles, seguras y funcionales. Sin embargo, el diseño sobredimensionado de la cubierta metálica contradice estos principios al generar una serie de ineficiencias que impactan tanto en los costos de materia prima como en el tiempo de

ejecución del proyecto. Este sobredimensionamiento no solo implica un gasto innecesario de recursos materiales, sino que también aumenta los costos de producción y montaje debido a una mayor inversión en mano de obra requerida.

Además de las implicaciones económicas, el sobredimensionamiento del diseño tiene un impacto ambiental significativo. Un uso innecesario de materiales conlleva una mayor extracción de recursos naturales, una mayor producción de metales, y un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos factores no solo afectan la sostenibilidad del proyecto, sino que también contribuyen a la degradación ambiental, lo que contradice las tendencias actuales hacia una construcción más sostenible y responsable con el medio ambiente.

Por lo tanto, es imprescindible revisar y optimizar el diseño estructural de la cubierta del último piso para adaptarlo a las modificaciones realizadas en la obra civil. Esta optimización no solo permitirá reducir costos y minimizar los retrasos en el proyecto, sino que también asegurará una construcción más eficiente y segura, alineada con los principios de sostenibilidad. Al abordar este problema de manera integral, se garantiza que el proyecto "Arrayanes de San Sebastián" no solo cumpla con los estándares de calidad, sino que también responda adecuadamente a las necesidades y expectativas de los futuros residentes.

JUSTIFICACIÓN

El proyecto de vivienda de interés social "Arrayanes de San Sebastián" enfrenta un problema crítico que debe abordarse para asegurar su viabilidad y éxito. La construcción de viviendas de interés social tiene como principal objetivo ofrecer soluciones habitacionales accesibles, seguras y funcionales, lo que exige una planificación y ejecución eficientes en todas las etapas del proyecto. Sin embargo, en este caso, el diseño estructural de la cubierta del último piso del edificio la cual cuenta con un área de 200m² y un peso de 2.6 ton presenta un sobredimensionamiento significativo debido a modificaciones no previstas en la obra civil.

Este problema se originó cuando la inclusión de elementos de mampostería ("cuchillas") en la obra civil no fue adecuadamente integrada en el diseño inicial de la cubierta metálica. Como resultado, se ha generado una estructura sobredimensionada que utiliza más material del necesario. Este exceso no solo representa un uso ineficiente de los recursos, sino que también eleva los costos de construcción y prolonga el tiempo de ejecución debido a la mayor necesidad de mano de obra para la producción y el montaje.

Para abordar esta situación, se propone la optimización del diseño estructural mediante la implementación de un enfoque de "diseño paramétrico." Este método se basa en la definición y control de un conjunto de parámetros clave que determinan las dimensiones, formas, y otros aspectos fundamentales de una estructura. Entre estos parámetros se incluyen variables como el tipo de material, la carga que la estructura debe soportar, la geometría del espacio, las condiciones climáticas, entre otros. Al manipular estos parámetros en un software de modelado avanzado, es posible generar múltiples variaciones del diseño, evaluando y seleccionando la opción más eficiente en términos de uso de materiales, costo y rendimiento estructural.

Este enfoque permitirá ajustar de manera precisa y eficiente la estructura metálica, adaptando el diseño a las nuevas condiciones impuestas por las modificaciones en la obra civil. Al aplicar el diseño paramétrico, se busca no solo reducir el uso excesivo de material, sino también mejorar la eficiencia del soporte estructural, optimizando tanto los costos de producción como el tiempo necesario para el montaje.

La relevancia de este problema radica en las numerosas consecuencias negativas que puede generar. Desde una perspectiva económica, el uso innecesario de

materiales aumenta considerablemente los costos del proyecto, lo que resulta particularmente problemático en el contexto de las viviendas de interés social, donde el control de costos es crucial para garantizar la asequibilidad de las unidades habitacionales. Además, el sobredimensionamiento de la estructura incrementa el tiempo de ejecución del proyecto, lo que puede retrasar la entrega de las viviendas a los beneficiarios.

Desde el punto de vista ambiental, el problema es igualmente crítico. El uso innecesario de materiales implica una mayor extracción de recursos naturales y un aumento en la producción de metales, lo que conlleva una mayor emisión de gases de efecto invernadero y la generación de residuos. Estos impactos son contrarios a los principios de sostenibilidad que deben guiar la construcción moderna, especialmente en proyectos orientados a mejorar la calidad de vida de las comunidades más vulnerables.

En conclusión, la implementación de un enfoque de diseño paramétrico no solo es esencial para resolver el problema actual, sino que también ofrece una solución integral que mejora la eficiencia, reduce costos, y minimiza el impacto ambiental, asegurando que el proyecto cumpla con los más altos estándares de sostenibilidad y responsabilidad social.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO ARRAYANES DE SAN SEBASTIÁN

El proyecto **Arrayanes de San Sebastián** es una iniciativa de interés social que consta de 11 torres de 5 pisos. Cada torre cuenta en su último nivel con una cubierta metálica de 200m², cuyo peso es de 2.6 toneladas. Estas cubiertas están formadas por 32 vigas de perfil PHR encajonadas, 100 templeros angulares y 64 platinas de conexión. El diseño y cálculo estructural se realizaron de acuerdo con las especificaciones del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), siguiendo los requisitos de los títulos B y F.

En la Figura 1 se presenta una vista en planta de la cubierta, donde se distinguen las vigas principales PHR en forma de "C" como los elementos horizontales, mientras que los templeros angulares actúan como elementos de soporte vertical. Las vigas principales están ancladas mediante ménsulas en los extremos.

En resumen, el proyecto incluye 11 cubiertas de estructura metálica de 200m² cada una.

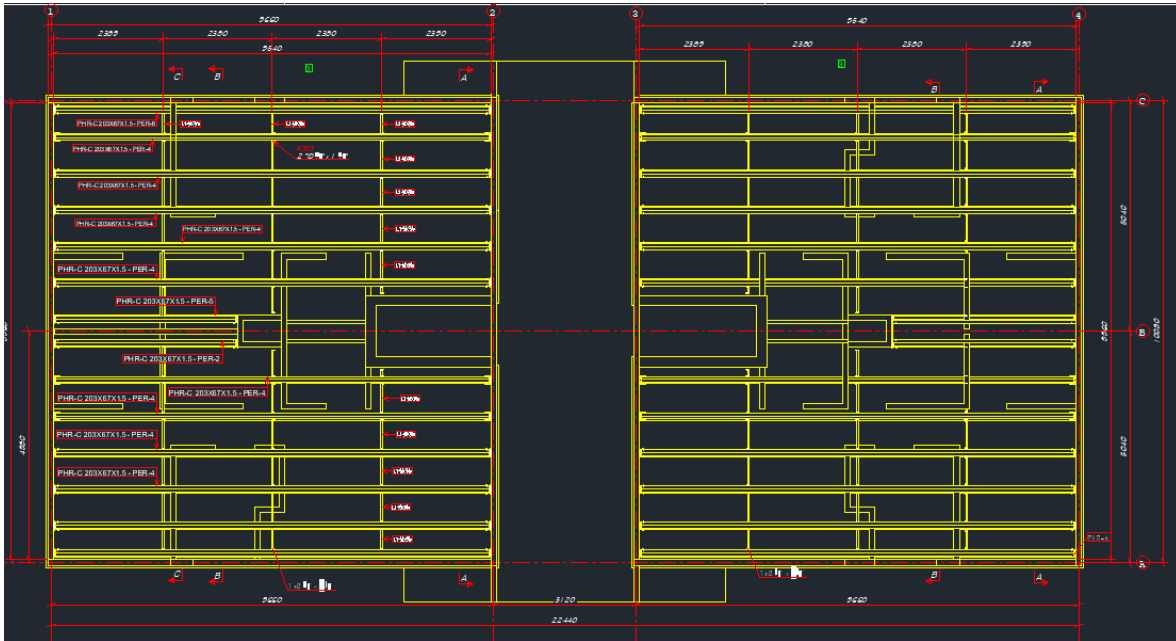


Figura 1 vista en planta del sistema estructural de cubierta Arrayanes de San Sebastián.

A continuación, en la Tabla 1 se detalla las cantidades para la producción de la estructura metálica de la cubierta de una sola torre:

PERFIL	MATERIAL	CANTIDAD POR TORRE (unidad)	CANTIDAD POR TORRE (m)
ANCLA CUÑA 1/2"x3-3/4"	ACERO AL CARBONO	256	
VARILLA 3/8"	A193-GR.2	9	27
TUERCA 3/8"	A194-GR50	256	
ARANDELA 3/8"	GR.2-ZINC	256	
PHR-C203X67X1.5mmx 6m	A1011-GR.50	84	532.3
PL 2mm 4x8 ft	A36	1	
PL 6mm 4x8 ft	A36	1	
PL 9mm 4x8 ft	A36	1	
ANGULO 1-1/2"x1/8" x 6m	A572-GR.50	12	61.45

Tabla 1 cantidad de materiales por 1 torre.

NORMAS APLICADAS

En la totalidad del diseño y montaje se aplicaron los criterios, recomendaciones y normas de cada caso. A continuación, se enlistan las normas usadas en este proyecto:

- Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Ley 400 de 1997 (Modificada Ley 1229 de 2008), Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.
- Manual of Steel Construction – Load and Resistance Factor Design (LRFD), American Institute of Steel Construction – AISC.
- American Iron and Steel Institute, AISI, Cold Formed Steel Design Manual.
- Normas AWS D1.1 y D1.3 (Structural Welding Code – Steel), American Welding Society.
- Normas ASTM para ensayos y materiales. American Society for Testing and Materials.

MATERIALES Y PROPIEDADES MECÁNICAS.

La especificación de los materiales utilizados en la etapa de producción de la cubierta metálica se presenta en la Tabla 2.

Material	Propiedades Mecánicas	Otras especificaciones
Perfiles en acero, ASTM A653SS GRADO 50	esfuerzo de fluencia $\sigma_Y = 350 MPa$ esfuerzo último $\sigma_U = 450 MPa$	PHR en c 203x67x1.5mm
Perfiles en acero, ASTM A572 A36 grado 50	esfuerzo de fluencia $\sigma_Y = 250 MPa$ esfuerzo último $\sigma_U = 450 MPa$	Lamina 2mm Lamina 6mm Lamina 9mm Angulo $1 - 1/2 \times 1/8$ "
Tornillería ASTM A325	Resistencia mínima a la tracción = $827 MPa$	Anclas cuña $1/2" \times 3-3/4"$
Tornillería ASTM A490	Resistencia mínima a la tracción = $1034 MPa$	tuerca $3/8"$
Barra roscada ASTM A193 GR B7	Resistencia mínima a la tracción = $862 MPa$	varilla $3/8"$

Tabla 2 especificación de los materiales Fuente: Manual de la AISC, Tabla 2-4, p. 2-48

Durante la producción en planta, las soldaduras se ejecutaron utilizando la tecnología MIG 70s, mientras que en la etapa de montaje las soldaduras se realizaron mediante

electrodos revestidos E-7018 o E-6011, conforme con las especificaciones vigentes de la norma AWS D.1.1.

CARGAS EVALUADAS.

En el proyecto **Arrayanes de San Sebastián** se evaluaron las cargas de acuerdo con sus diversas fuentes y se clasificaron en diferentes tipos según su naturaleza, las cuales se muestran en la Tabla 3.

Cargas evaluadas	
Carga viva	50 Kgf/m ²
Carga muerta	5 Kgf/m ²
Carga granizo	100 Kgf/m ²
Carga viento	40.8 Kgf/m ²

Tabla 3 cargas evaluadas.

ALCANCE

Se propone un nuevo diseño estructural para la cubierta Arrayanes de San Sebastián, basado en un enfoque de diseño paramétrico. El objetivo es modificar su geometría a fin de optimizar recursos en términos de mano de obra, materiales, costos, y tiempos de fabricación y montaje. Con este rediseño, se elaborará un informe comparativo que analice el diseño actual frente al diseño propuesto, utilizando el software SAP2000 como herramienta de análisis. El proyecto empleará perfiles comerciales PTE 120X60X2mm, para asegurar eficiencia y disponibilidad en el mercado. Las cubiertas rediseñadas son estructuras regulares y simétricas, cuyas dimensiones geométricas se establecieron de manera que los elementos cumplieran con las condiciones de carga y esfuerzos, manteniéndose dentro de los rangos permitidos por los perfiles comerciales disponibles.

MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de optimizar el diseño estructural de la cubierta del proyecto de vivienda de interés social **Arrayanes de San Sebastián**, fue fundamental comprender de manera integral diversos conceptos y técnicas de ingeniería estructural. Este marco teórico incluye la optimización de diseños de cubiertas metálicas, la identificación y evaluación de cargas, el análisis paramétrico y la simulación con software especializado.

OPTIMIZACIÓN DE DISEÑOS ESTRUCTURALES DE CUBIERTAS METÁLICAS

En esta sección, se exploran los métodos de optimización de estructuras metálicas desde los principios básicos de la ingeniería civil hasta su desarrollo actual. En el pasado, el diseño estructural en acero dependía más de la intuición y el sentido estético que del cálculo riguroso. Con la aparición de las primeras vigas de patín ancho a principios del siglo XIX, surgieron los primeros programas computacionales capaces de analizar y predecir el comportamiento de piezas individuales, conexiones y estructuras en general. Esto marcó el inicio de una nueva era en la que se emplean métodos estadísticos y modelos matemáticos basados en experiencias previas.

Los modernos programas de simulación optimizan el diseño, análisis y operación de sistemas al permitir la creación de representaciones virtuales de sistemas físicos. Esto facilita la comprensión de comportamientos complejos sin necesidad de construir prototipos físicos.

Además, los programas de simulación son herramientas esenciales que permiten evaluar el rendimiento de un diseño antes de su implementación, identificando posibles fallos o ineficiencias. También posibilitan la realización de simulaciones bajo diferentes escenarios, lo que ayuda a evaluar y mitigar riesgos potenciales. En resumen, estos programas son valiosos en la ingeniería, mejorando la eficiencia, la precisión y la seguridad en el desarrollo de proyectos.

En la ingeniería civil contemporánea, uno de los principales desafíos es maximizar el uso de los recursos, lo que implica la aplicación de metodologías de optimización sin comprometer los estándares de calidad y funcionamiento para los que las estructuras fueron diseñadas. Según Zapata (2004), la optimización solía depender de la intuición y el buen juicio, pero hoy en día contamos con una amplia gama de métodos matemáticos y computacionales que facilitan esta tarea. Estos métodos permiten cuantificar los parámetros necesarios para la optimización, considerando funciones que se desean minimizar y las restricciones asociadas, como esfuerzos máximos, deformaciones permisibles y disponibilidad de materiales. Estas restricciones limitan las variables que afectan la función objetivo, tales como:

- Costo mínimo
- Peso mínimo
- Tiempo de construcción mínimo
- Trabajo mínimo.

La optimización de cubiertas metálicas es un proceso integral que abarca tanto el uso eficiente de materiales como la mejora del diseño estructural. Para maximizar la eficiencia, es fundamental equilibrar varios factores como la reducción de costos, la resistencia y la seguridad para eso se emplean técnicas de diseño avanzadas, como el uso de celosías y refuerzos, mejora la distribución de cargas y generan formas estructurales más eficientes, además, los diseños paramétricos permiten crear geometrías más eficientes, adaptando la forma de la cubierta a las necesidades específicas del proyecto.

El acero estructural, las aleaciones de aluminio y los materiales compuestos, como el acero galvanizado y el acero inoxidable, son comunes en las cubiertas metálicas. Los avances en recubrimientos, que aumentan la durabilidad y la resistencia a la corrosión, son esenciales para prolongar la vida útil de las estructuras en entornos agresivos.

El diseño debe garantizar que la estructura soporte adecuadamente las **cargas vivas** (uso y ocupación), **cargas muertas** (peso propio) y cargas eventuales (como viento, sismos, nieve o agua). Se emplean combinaciones de cargas basadas en métodos estadísticos para asegurar que los límites de desplazamiento, resistencia y rigidez sean adecuados, cumpliendo con los estándares de seguridad y funcionalidad.

Un aspecto adicional de la optimización es la sostenibilidad minimizar el uso de materiales y maximizar la eficiencia estructural no solo reduce costos, sino que también disminuye el impacto ambiental al reducir el consumo de recursos y energía en la fabricación y transporte de los materiales; este enfoque multidimensional asegura que las cubiertas metálicas no solo sean eficientes en términos de costo y material, sino también seguras, duraderas y capaces de enfrentar diversas condiciones ambientales y de carga. La referencia (Zapata Baglietto n.d.) enfatiza la importancia de los controles de desplazamiento, resistencia y rigidez en el diseño estructural.

PARÁMETROS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Los parámetros de diseño estructural son criterios clave que guían el desarrollo y análisis de una estructura, garantizando su resistencia, estabilidad y funcionalidad bajo las condiciones previstas. Estos parámetros son esenciales para asegurar que una estructura cumpla con los requisitos de seguridad, durabilidad y eficiencia económica. A continuación, te menciono algunos de los más importantes:

CARGAS (FUERZAS ACTUANTES)

En el diseño de una estructura, se deben considerar todas las cargas reales que actuarán en la estructura y en su evaluación el propósito es determinar las fuerzas que actúan sobre una estructura y garantizar que ésta pueda soportarlas de manera segura y eficiente. Estas cargas pueden provenir de diversas fuentes y se clasifican en diferentes tipos según su naturaleza (ASCE 7-16)

CARGA MUERTA [D]

Las cargas muertas son cargas de gravedad de magnitud constante y en ubicaciones fijas que actúan de manera permanente en la estructura. Son aquellas que provienen del peso propio de la estructura y de los elementos permanentes, como techos, paredes, pisos y cualquier otro componente fijo; no cambian con el tiempo y son constantes durante la vida útil de la estructura. Esta carga se calcula con base en los estándares de construcción que dictan los códigos estructurales. (NSR10-título B).

El peso de la estructura no se conoce de manera precisa antes de iniciar el diseño, por lo general, se estima con base en la experiencia. Una vez que se realiza el análisis estructural y definir las dimensiones de los elementos, se calcula el peso real utilizando estas dimensiones junto con el peso por unidad de longitud de los materiales correspondientes. Posteriormente, se compara este peso real con la estimación inicial y, de ser necesario, se ajusta el diseño. Los pesos por unidad de los materiales de construcción se presentan en la Tabla 4, mientras que el peso de equipos permanentes, como los sistemas de calefacción o aire acondicionado, suele ser proporcionado por el fabricante.(Kassimali n.d.)

Tabla 4. unidades de peso de materiales de construcción

Material	Peso para 1 unidad	Para 1 cubierta
	<i>Kg/m</i>	<i>Kg/m</i>
PHR en C 203x67x1.5mm x 6m	25.29	2.124
PI 2mm 4x8 ft	45.22	45.22
PI 6mm 4x8 ft	135.70	135.70

Pl 9mm 4x8 ft	206.86	206.86
Angulo 1-1/2"x1/8" x 6m	10.98	131.76
Anclas cuña 1/2"x3-3/4"		
Varilla 3/8" x 3m	1.30	11.7
Tuerca 3/8"		
Arandela 3/8"		
PESO TOTAL		2655

CARGA VIVA [L].

Estas cargas se originan por el uso y la ocupación del edificio, excluyendo las cargas ambientales o de construcción (NSR10 - Título B). Son variables a lo largo del tiempo y no son permanentes. Ejemplos comunes de estas cargas incluyen el peso de las personas, los muebles, los vehículos en un estacionamiento y diversos equipos.

CARGA VIVA PARA ESTRUCTURAS

De acuerdo con la norma NSR-10, las cargas se determinan en función de la estructura y la inclinación de la cubierta, tal como se especifica en la Tabla B.4.2.1-2. Esta normativa establece que para cubiertas inclinadas con una pendiente igual o inferior a 15°, la carga viva es de 50 kg/m², como se detalla en la Tabla 5.

Tipo de cubierta	Carga uniforme (kN/m ²) m ² de área en planta	Carga uniforme (kgf/m ²) m ² de área en planta
Cubiertas, Azoteas y Terrazas	la misma del resto de la edificación (Nota-1)	la misma del resto de la edificación (Nota-1)
Cubiertas usadas para jardines de cubierta o para reuniones	5.00	500
Cubiertas inclinadas con más de 15° de pendiente en estructura metálica o de madera con imposibilidad física de verse sometidas a cargas superiores a la aquí estipulada	0.35	35
Cubiertas inclinadas con pendiente de 15° o menos en estructura metálica o de madera con imposibilidad física de verse sometidas a cargas superiores a la aquí estipulada	0.50	50

Tabla 5 Carga viva de cubierta.

CARGA DE ACUMULACIÓN DE NIEVE Y/O GRANIZO:

Dependiendo del clima de la región, las cubiertas deben diseñarse para soportar cargas de nieve, que se calculan según las normativas locales sobre acumulación y distribución de nieve (ASCE 7, 2020). Según la norma NSR-10 en el capítulo B.4.8.3.2 observamos la carga de granizo indica que es de $100\text{Kgf}/\text{m}^2$ da este valor ya que la cubierta tiene una inclinación menor a 15°

B.4.8.3 — CARGA DE GRANIZO

B.4.8.3.1 — Las cargas de granizo, G , deben tenerse en cuenta en las regiones del país con más de 2 000 metros de altura sobre el nivel del mar o en lugares de menor altura donde la autoridad municipal o distrital así lo exija.

B.4.8.3.2 — En los municipios y distritos donde la carga de granizo deba tenerse en cuenta, su valor es de $1.0\text{ kN}/\text{m}^2$ ($100\text{ kgf}/\text{m}^2$). Para cubiertas con una inclinación mayor a 15° este valor puede reducirse a $0.5\text{ kN}/\text{m}^2$ ($50\text{ kgf}/\text{m}^2$).

carga de granizo Fuente tomada de la norma NSR-10 Título B

CARGAS DE VIENTO [W].

Se refieren a las fuerzas que ejerce el viento sobre la estructura, tanto de manera lateral como vertical. En áreas con vientos fuertes, este tipo de carga puede ser significativo y debe considerarse en el diseño estructural. Las fuerzas del viento se determinan según la velocidad máxima esperada y la dirección predominante. Los códigos de construcción establecen métodos para calcular la presión del viento y las cargas sobre la estructura. Las cargas de viento son producidas por el flujo de aire alrededor de la estructura.

Las magnitudes de las cargas de viento que pueden actuar en una estructura dependen de la localización geográfica de la misma, de obstrucciones alrededor del terreno, tales como edificios vecinos, y de la geometría y las características de vibración de la estructura. A pesar de los procedimientos descritos en varios códigos para estimar las cargas de viento, estas usualmente varían en detalle, la mayoría de ellas están basadas en la misma relación básica entre la velocidad del viento V y la presión dinámica q en una superficie plana normal bajo el flujo del viento, el cual puede ser obtenido aplicando el principio de Bernoulli y la expresión es:

$$q = \frac{1}{2}\rho V^2 \text{ Ec. (1)}$$

En ella, ρ indica la densidad de la masa de aire, la velocidad V a usar para determinar la carga de diseño en la estructura dependerá de la posición geográfica y se puede obtener por datos meteorológicos de la región. (Kassimali n.d.)

Para dar cuenta de la variación de la velocidad del viento respecto de la altura y el entorno en el cual la estructura está localizada, la Norma ASCE 7 modifica la Ec. (1) como

$$q_z = 0.00256K_zK_{zt}K_dV^2 \text{ Ec. (2)}$$

En ella q_z es la velocidad de presión a la altura z en libras por pie cuadrado; V es la velocidad básica de diseño en millas por hora, K_z es el coeficiente de exposición de presión de velocidad; K_{zt} es el factor de topografía; y K_d es el factor de direccionalidad del viento. Cuando convertimos a unidades del SI, la Ec. (2) resulta:

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dV^2 \text{ Ec. (3)}$$

Con q_z y V ahora expresadas en unidades de N/m^2 y m/s respectivamente.

CARGA SÍSMICA:

En áreas sísmicas, se deben considerar las fuerzas generadas por terremotos, utilizando métodos como la respuesta espectral y el análisis dinámico para evaluar el comportamiento estructural bajo estos eventos. Además de estimar las magnitudes de las cargas de diseño, también debe considerar la posibilidad de que estas actúen de manera simultánea en la estructura. La estructura finalmente se diseña para que resista las combinaciones de cargas más desfavorables que posiblemente ocurran en su vida útil.

La magnitud de las cargas sísmicas varía según la ubicación geográfica. En el caso del proyecto Arrayanes de San Sebastián, situado en La Ceja, en la Tabla 6 obtenemos datos del coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva A_a y A_v que serán fundamentales para realizar los cálculos y evaluaciones necesarios en el diseño estructural.

Municipio	Codigo de municipio	A_a	A_v	Zona de amenaza sísmica
La ceja	05376	0.15	0.20	intermedia

Tabla 6 Aceleración horizontal para sismo según su ubicación.

PERIODOS DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

Los períodos del espectro de respuesta pueden variar según el tipo de perfil del suelo en el que se ubica una edificación. La clasificación de estos perfiles, en función de su comportamiento ante cargas sísmicas, influye significativamente en la respuesta sísmica de las estructuras. Los períodos del espectro son valores fundamentales en el análisis sísmico, ya que representan la reacción de un sistema oscilante ante un movimiento sísmico. Estos períodos están directamente relacionados con la frecuencia natural de vibración de las estructuras, lo que permite prever cómo se comportará una edificación durante un sismo. (NSR-10)

Para el cálculo del coeficiente de amplificación F_a que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos debido a los efectos de sitio. Para el tipo de perfil se consideró el tipo D correspondiente al que tenemos en sitio. Según Tabla 6 indica que el coeficiente A_a es de 0.15. Con este valor, al consultar la Tabla 8, obtenemos un F_a de 1.6, el cual se utilizó en la simulación realizada con el software SAP2000.

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Tabla 7 Valores de F_a para zona de periodos cortos del espectro. Fuente tomada de la norma NSR-10 Título A

Para el cálculo del coeficiente de amplificación F_v que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios debido a los efectos de sitio. Para el tipo de perfil se consideró el tipo D correspondiente al que tenemos en sitio. Según Tabla 6 indica que el coeficiente A_v es de 0.20. Con este valor, al consultar la Tabla 8, obtenemos un F_v de 2, el cual se utilizó en la simulación realizada con el software SAP2000.

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Tabla 8 Valores F_v para zona de periodos intermedios del espectro. Fuente tomada de la norma NSR-10 Titulo A

MATERIALES

La selección de los materiales es crucial, ya que influye directamente en la resistencia, peso y comportamiento de la estructura. Los materiales comunes incluyen acero, hormigón, madera y compuestos, cada uno con sus propias propiedades mecánicas, como:

- Resistencia a la tracción y compresión.
- Rigidez (módulo de elasticidad).
- Ductilidad y tenacidad.

ESTABILIDAD

La estabilidad asegura que la estructura no colapse bajo condiciones normales o extremas. Para mantener la estabilidad se deben controlar:

- **Desplazamientos y deformaciones:** Las estructuras no deben experimentar deformaciones excesivas que comprometan su funcionalidad.
- **Pandeo:** Especialmente en miembros delgados sometidos a compresión, como columnas.
- **Vuelco o deslizamiento:** Factores que afectan la estabilidad global de la estructura.

RESISTENCIA Y SEGURIDAD

Una estructura no sólo debe ser capaz de soportar las cargas impuestas de manera segura, sino también hacerlo de tal forma que las deflexiones y vibraciones resultantes no sean excesivas ni alarmen a los ocupantes (McCormac, 2013).

La estructura debe ser capaz de resistir las cargas previstas sin fallar. Para garantizar esto, se incorporan factores de seguridad en el diseño, que permiten abordar imprecisiones en los cálculos y variaciones inesperadas en las condiciones. Los elementos clave en la resistencia estructural incluyen:

- Límites de resistencia de los materiales.
- Capacidad portante de los elementos estructurales.
- Identificación de puntos críticos donde pueden concentrarse las tensiones.

Estos aspectos son fundamentales para asegurar la durabilidad y estabilidad de la estructura a lo largo del tiempo.

RIGIDEZ

La rigidez es la capacidad de una estructura para resistir deformaciones. Es especialmente importante en edificios altos y puentes, donde es fundamental limitar los desplazamientos laterales causados por fuerzas como el viento o los terremotos.

DURABILIDAD

El diseño debe considerar la durabilidad de los materiales y la estructura a lo largo del tiempo, tomando en cuenta factores como:

- Corrosión.
- Desgaste por cargas repetitivas.
- Factores ambientales que puedan degradar los materiales (agua, salinidad, radiación solar).

FUNCIONALIDAD Y ESTÉTICA

Además de la seguridad, la estructura debe cumplir con su propósito funcional y estético. Esto implica:

- Distribución eficiente de los espacios.
- Facilidad de construcción y mantenimiento.
- Atractivo visual, especialmente en edificios públicos o monumentos.

OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS

La utilización eficiente de materiales y tiempo es un aspecto fundamental. La optimización estructural tiene como objetivo lograr un diseño que reduzca los costos de construcción y operación, sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad. Es esencial considerar estrategias para disminuir los costos de construcción sin sacrificar la resistencia. Esto incluye el uso de elementos de tamaño estándar, conexiones y detalles simplificados, así como seleccionar miembros y materiales que requieran un mantenimiento mínimo a lo largo del tiempo (McCormac, 2013).

MÉTODO DE DISEÑO PARAMÉTRICO:

El diseño paramétrico permite la modificación y optimización de geometrías y materiales mediante el ajuste de parámetros variables en el modelado digital. Softwares como Rhino con Grasshopper y Revit permite una rápida iteración y ajuste de diseños basados en reglas definidas, (Oxman, 2017).

Entre los beneficios del diseño paramétrico encontramos que facilita la exploración de múltiples configuraciones de diseño y la evaluación de alternativas, optimizando el uso de materiales y mejorando la eficiencia estructural

Para su implementación se deben definir los parámetros relevantes como las dimensiones de los elementos estructurales, los ángulos de inclinación, y las distancias entre soportes para encontrar la solución más eficiente en términos de resistencia y costo (Liu et al., 2021).

SIMULACIÓN CON SOFTWARE SAP2000

SAP2000 es una herramienta de modelado y análisis estructural que permite simular el comportamiento de estructuras metálicas bajo diversas condiciones de carga. Ofrece análisis tanto estáticos como dinámicos, facilitando la evaluación de la respuesta estructural.

en el proceso de simulación se Incluye la creación de un modelo digital de la estructura, la asignación de materiales y propiedades, la aplicación de cargas y la realización de análisis para determinar la respuesta estructural a las cargas especificadas. (CSI, 2023).

según (Baker et al., 2022) los resultados de la simulación deben ser revisados para asegurar que cumplan con los requisitos de diseño y seguridad. según sea necesario se realizan ajustes en el modelo paramétrico y repetir las simulaciones.

METODOLOGÍA:

En el presente trabajo se llevará a cabo la siguiente metodología:

1. Evaluar el Diseño Actual de la Cubierta:

- Analizar el diseño estructural actual de la cubierta del proyecto de vivienda de interés social, identificando aspectos críticos, puntos débiles y áreas de mejora.
- Revisar los planos, especificaciones y cálculos estructurales existentes para entender las decisiones de diseño originales.

2. Identificar Requerimientos y Normativas:

- Revisar las normativas y estándares de diseño estructural aplicables a viviendas de interés social en la región para garantizar que el diseño cumpla con todos los requisitos legales y técnicos.
- Identificar los requerimientos específicos de carga, seguridad y durabilidad para la cubierta de acuerdo con el uso previsto y el entorno.

3. Analizar las cargas permanentes: Evaluar el peso propio de la estructura de la cubierta, incluyendo materiales de construcción y elementos fijos, para determinar las cargas muertas que afectan la cubierta.

- 1. Evaluar las cargas vivas:** Identificar y calcular las cargas variables que pueden aplicarse a la cubierta durante su uso, como el peso de las personas, muebles y otros objetos móviles.
- 2. Considerar las cargas ambientales:** Estudiar y cuantificar las cargas impuestas por factores ambientales, tales como nieve, viento y sismos, de acuerdo con las normativas y condiciones climáticas locales.
- 3. Aplicar metodologías de cálculo:** Utilizar técnicas y herramientas de análisis estructural para calcular y modelar las cargas combinadas y su impacto en el diseño de la cubierta.
- 4. Generar un informe detallado:** Documentar los resultados del estudio de cargas estructurales, incluyendo los cálculos realizados, las suposiciones y metodologías utilizadas, y las conclusiones sobre la capacidad de la cubierta para soportar las cargas identificadas.

4. Proponer Soluciones de Optimización:

- Desarrollar alternativas de diseño que optimicen la eficiencia estructural, minimizando el uso de materiales y costos sin comprometer la seguridad y funcionalidad de la cubierta.

- Evaluar nuevas tecnologías, materiales y métodos constructivos que puedan mejorar el rendimiento y la sostenibilidad del diseño estructural.

5. Realizar Simulaciones y Análisis Estructural:

- Implementar simulaciones y análisis estructurales utilizando software especializado para comparar el rendimiento de las alternativas de diseño propuestas.
- Evaluar la resistencia, estabilidad y comportamiento de la cubierta bajo diferentes condiciones de carga y entorno.

6. Evaluar el Impacto Económico:

- Analizar el costo de implementación de las soluciones de optimización propuestas en comparación con el diseño original.
- Estimar el ahorro en materiales y costos de construcción, así como los beneficios a largo plazo en términos de mantenimiento y durabilidad.

7. Desarrollar Recomendaciones de Implementación:

- Elaborar un conjunto de recomendaciones detalladas para la implementación de las soluciones de optimización, incluyendo modificaciones en el diseño, materiales sugeridos y cambios en el proceso constructivo.
- Proporcionar un plan de transición para aplicar las recomendaciones en el proyecto actual, considerando posibles ajustes en el cronograma y presupuesto.

8. Documentar el Proceso de Optimización:

- Documentar todos los pasos del proceso de optimización, incluyendo el análisis inicial, las alternativas propuestas, los resultados de las simulaciones, y las recomendaciones finales.
- Preparar un informe técnico que resuma los hallazgos y justifique las decisiones tomadas durante el proceso de optimización.

ANALISIS DE CARGAS EN EL NUEVO DISEÑO

CARGA MUERTA

Para la carga muerta tomamos del análisis de cargas del diseño inicial el peso de la teja de la cubierta que es igual a **5 Kgf/m²** es una teja Standing Seam como se muestra en la Figura 2.



Figura 2 Teja Standing Seam

CARGA VIVA

Para la carga viva tomamos del marco teórico en la Tabla 5 Carga viva de cubierta. La cual corresponde a un valor de 50 kg/m^2 para cubiertas con una inclinación de 15° o menos.

CARGA DE GRANIZO

Para esta carga nos basamos en el marco teórico que nos dice que según la norma NSR-10 en el capítulo B.4.8.3.2 la carga de granizo indica que es de 100 Kg/m^2 da este valor ya que la cubierta tiene una inclinación menor a 15°

CARGA DE VIENTO

Para este cálculo, Se usa la norma NSR-10, título B, que ofrece tres métodos para el cálculo de las fuerzas del viento. El método más adecuado para las especificaciones de la estructura a diseñar es el método 2, "procedimiento analítico".

Sistemas principales de resistencia de fuerzas de viento

Edificios rígidos de cualquier altura

Las presiones de viento de diseño para el SPRFV de edificios se determinarán mediante la ecuación:

$$p = qGC_p - q_i (GC_{pi})$$

Donde:

- $q = q_z$ para paredes a barlovento evaluadas a una altura z por encima del terreno.

- $q = q_h$ para paredes a sotavento, paredes de costado y cubiertas, evaluadas a una altura h .
- $q_i = q_h$ para paredes a barlovento, paredes de costado, paredes a sotavento y cubiertas de edificios cerrados y para la evaluación de presiones internas negativas en edificios parcialmente cerrados.

Con base en lo anterior, podemos establecer que $q = q_z$ y, a su vez, $q_i = q_z$. A partir de estos datos, utilizaremos la siguiente ecuación para determinar q_z que representa la presión por velocidad

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dV^2$$

Para aplicar esta ecuación, es necesario calcular K_z . Según la norma NSR-10, título B, en la Tabla B.6.5-3, el valor de K_z depende de la altura del edificio. En este caso, la altura es de 12 metros, por lo que se debe considerar el uso de las cargas para sotavento y barlovento por separado por lo tanto utilizamos los casos 1 y 2 en exposición C debido a las condiciones del terreno, en la Tabla 9 el valor obtenido es de 1.04.

Altura sobre el terreno Z	Exposición, Nota 1			
	B		C	D
m	Caso 1	Caso 2	Casos 1 y 2	Casos 1 y 2
0 - 45	0.7	0.57	0.85	1.03
6.0	0.7	0.62	0.90	1.08
7.5	0.7	0.66	0.94	1.12
9.0	0.7	0.70	0.98	1.16
12.0	0.76	0.76	1.04	1.22
15.0	0.81	0.81	1.09	1.27
18.0	0.85	0.85	1.13	1.31
20.0	0.89	0.89	1.17	1.34
24.5	0.93	0.93	1.21	1.38
27.5	0.96	0.96	1.24	1.40
30.5	0.99	0.99	1.26	1.43
36.5	1.04	1.04	1.36	1.52
42.5	1.09	1.09	1.36	1.52
49.0	1.13	1.13	1.39	1.55
55.0	1.17	1.17	1.43	1.58
60.0	1.20	1.20	1.46	1.61
76.0	1.28	1.28	1.53	1.68
90.0	1.35	1.35	1.59	1.73
107.0	1.41	1.41	1.64	1.78
122.0	1.47	1.47	1.69	1.82
137.0	1.52	1.52	1.73	1.86
152.0	1.56	1.56	1.77	1.89

Tabla 9 coeficiente de exposición para la presión dinámica K_z .
Fuente tomada de la NSR-10 título B.

El factor topográfico K_{zt} que se define como el efecto de aumento de velocidad de viento se calcula de la siguiente manera

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$$

La Norma NSR-10 Titulo B dice “Si el sitio o la localización de la estructura no cumple las condiciones especificada entonces $K_{zt} = 1.0$ ”

De acuerdo a lo anterior la ubicación del edificio no cumple con ciertas condiciones utilizaremos a $K_{zt} = 1.0$

Para hallar K_d que es el factor de direccionalidad de viento nos ubicamos en la Tabla 10, en la columna “Tipo de estructura” en nuestro caso tomamos el primer ítem dando así un valor de $K_d = 0.85$

ITEM	Tipo de Estructura	Factor de Direccionalidad del Viento, K_d *
1	Edificios	0.85
	Sistema Principal de Resistencia de Cargas de Viento	
2	Componentes y Recubrimientos	0.85
	Cubiertas Abovedadas	
3	Chimeneas, Tanques y Estructuras Similares	0.95
	Cuadradas	
	Hexagonales	
	Redondas	
4	Avisos Sólidos	0.85
5	Avisos Abiertos y Estructura Rectangular	0.85
6	Torres en Celosía	0.85
	Triangular, Cuadrada y Rectangular	
	Todas las otras secciones transversales	

Tabla 10 Factor de direccionalidad del viento Fuente tomada de la Norma NSR-10 Titulo B

Para determinar la velocidad del viento, tomamos como referencia la Figura 3, donde se muestra la ubicación exacta de La Ceja en el mapa de Colombia. Al trasladar esta ubicación a la Figura 4, se concluye que la estructura se encuentra en la región 3, lo que corresponde a una velocidad del viento de 28 m/s.



Figura 4 Ubicación de la Ceja en el mapa de Colombia.

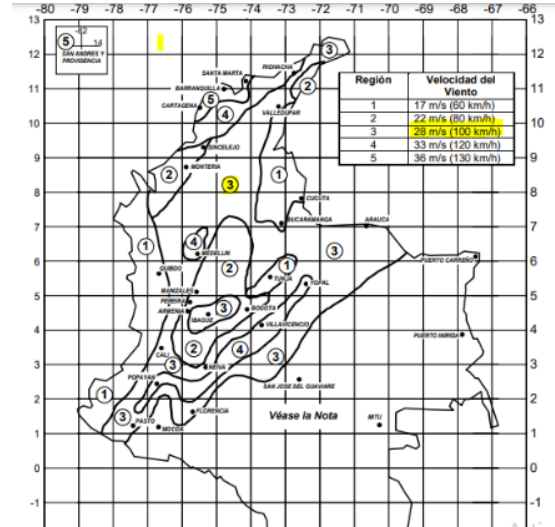


Figura 3 Velocidad del viento por Regiones.

“El Coeficiente de Importancia, I , modifica el espectro, y con ello las fuerzas de diseño, de acuerdo con el grupo de uso a que esté asignada la edificación” (NSR-10 Título A).

Para determinar el coeficiente de importancia I , nos referimos a la norma, la cual clasifica la edificación en el Grupo I: "Estructuras de ocupación normal - Este grupo incluye todas las edificaciones que están dentro del alcance del Reglamento, pero que no pertenecen a los Grupos II, III o IV."

La Tabla 11 muestra los valores del Coeficiente de Importancia según el grupo de uso. Para el Grupo de Uso I, el coeficiente de importancia es 1.0.

Valores del coeficiente de importancia, I

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Tabla 11 Valor de coeficiente de importancia. Fuente tomado de la Norma NSR-10 Título A.

Para hallar el coeficiente de presión interna GC_{pi} a usarse en la determinación de cargas de viento para edificios clasificamos el edificio con la ayuda de la Tabla 12 en el ítem número 3 dando así un valor para

$G_{C_{pi}} = 0.18$ y -0.18

ITEM	Clasificación del Cerramiento	$G_{C_{pi}}$
1	Edificios Abiertos	0.00
2	Edificios Parcialmente Cerrados	0.55 -0.55
3	Edificios Cerrados	0.18 -0.18

Tabla 12 Coeficiente de presión interna, Fuente tomado de la Norma NSR-10 Titulo B.

El coeficiente de presión externa C_p para edificios total o parcialmente cerrados

Según la Tabla 13 se debe realizar la siguiente ecuación L/B donde $L = 9.66m$ y $B = 5.41$ siendo así $L/B = 1.785$

Superficie	L/B	C_p	Usar con
Muro en barlovento	Todos los valores	0.8	q_2
Muro en sotavento	0-1	-0.5	q_h
	2	-0.3	
Muros laterales	>4	-0.2	q_h
	Todos los valores	-0.7	

Tabla 13 Coeficiente de presión externa. Fuente tomado de la Norma NSR-10 Titulo B.

En este caso, debemos considerar todos los valores correspondientes al $L/B = 1.785$ para los muros de barlovento, sotavento y laterales, ya que la ubicación del edificio está expuesta a vientos provenientes de todas las direcciones.

En la Tabla 14 se puede observar los valores tomados de cada una de las direcciones del viento.

MURO BARLOVENTO	0,8
MURO SOTAVENTO	-0,3
MUROS LATERALES	-0,7

Tabla 14 Valores sean la dirección del viento para C_p .

Para el valor del Factor de Efecto Ráfaga G , nos basamos en la Norma NSR-10, que establece:

"Estructuras rígidas — Para estructuras rígidas, tal como se definen en la sección B.6.2, el factor de efecto ráfaga se tomará como 0.85."

Teniendo ya todos los valores de los coeficientes a necesitar aplicamos la fórmula para hallar la presión del viento.

$$p = qGC_p - q_i (GC_{pi})$$

En la Tabla 15 se muestran los valores hallados para la presión del viento, la cual no arroja un valor mayor a 400 N/m² y según la norma NSR-10 este valor no debe ser menor a 400 N/m².

De acuerdo con lo anterior, se decide tomar el valor de 400 N/m², de acuerdo con la norma NSR-10.

p	qz	G	Cp	qi	posiGcpi	negativo Gcpi	p positiva	p negativa
	438	0,85	0,8	438	0,18	-0,18	218,8760146	376,466745
	438	0,85	-0,3	438	0,18	-0,18	-190,4221327	-32,83140218
	438	0,85	-0,7	438	0,18	-0,18	-339,2578226	-181,6670921

Tabla 15 presión del viento.

RESULTADOS

La cubierta de Arrayanes de San Sebastián, cuenta con un área de 200 m², se dividió en cuatro partes para el diseño propuesto, dado que la mitad de la cubierta es simétrica y, a su vez, cada mitad presenta simetría interna. El diseño se llevó a cabo con el software SAP2000, como se muestra en la Figura 5.

Mediante el método de diseño paramétrico, se logró optimizar el peso utilizando el perfil estructural propuesto, un PTE 120X60X2mm. Este perfil, al ser más liviano, permitió optimizar tanto la producción como el montaje, logrando también una mayor eficiencia en términos de costos.

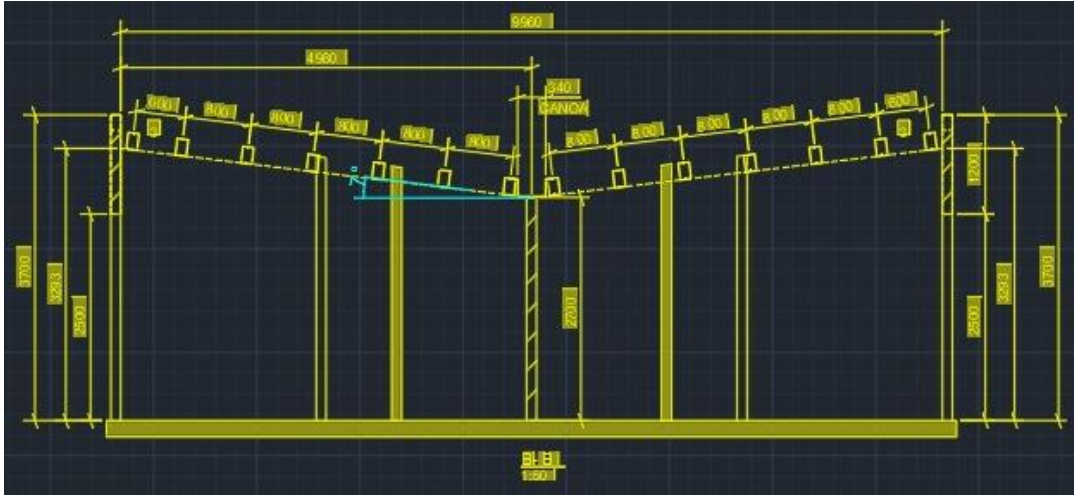


Figura 6. Sección transversal de la cubierta

Considerando que la cubierta tiene un área de 200m^2 y que tiene simetría por diseño constructivo, se toma la decisión de simular la cuarta parte de la cubierta, simplificando el proceso de rediseño.

En la Figura 7 se ilustra un cuarto de la cubierta a simular considerando que todas sus áreas y pendientes son iguales, con un área de 50m^2 y compuesta por 7 correas que corresponden a las líneas amarillas horizontales. De igual manera se observa la distribución de los muros 1, 2 y 3, acotados en color azul, que son los apoyos sobre los cuales descansa la estructura metálica. Es de mencionar que esta es una de las modificaciones surgidas del método paramétrico, por tanto, estos no fueron contemplados en el diseño inicial.

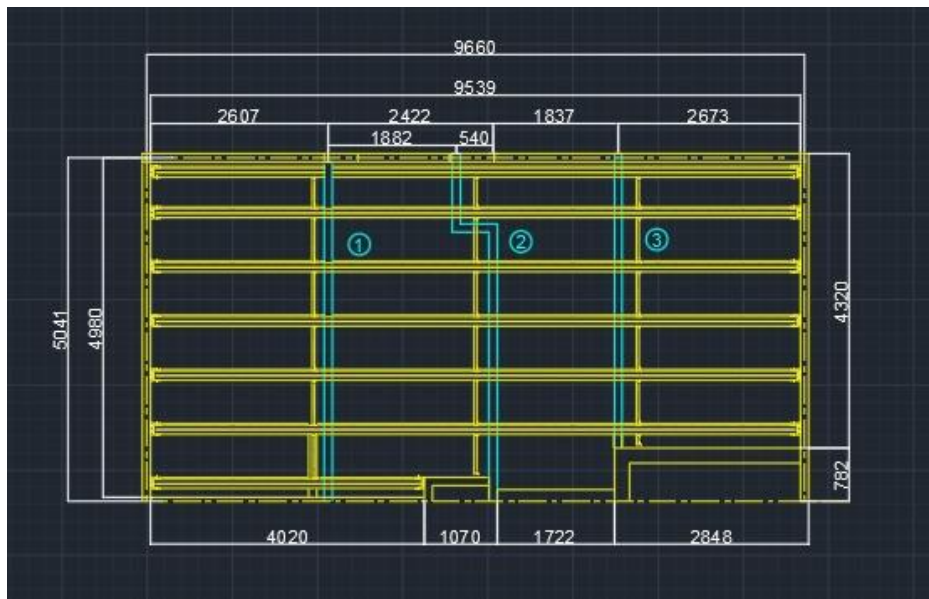


Figura 7. Vista en planta de la cuarta parte de la cubierta

SIMULACIÓN EN SAP.

Se inicia la simulación introduciendo los parámetros espaciales o de ubicación de los elementos al 3D frame de SAP 2000, lo anterior para obtener la GRID o “grilla”, ver Figura 8, que permitirá iniciar el diseño CAD.

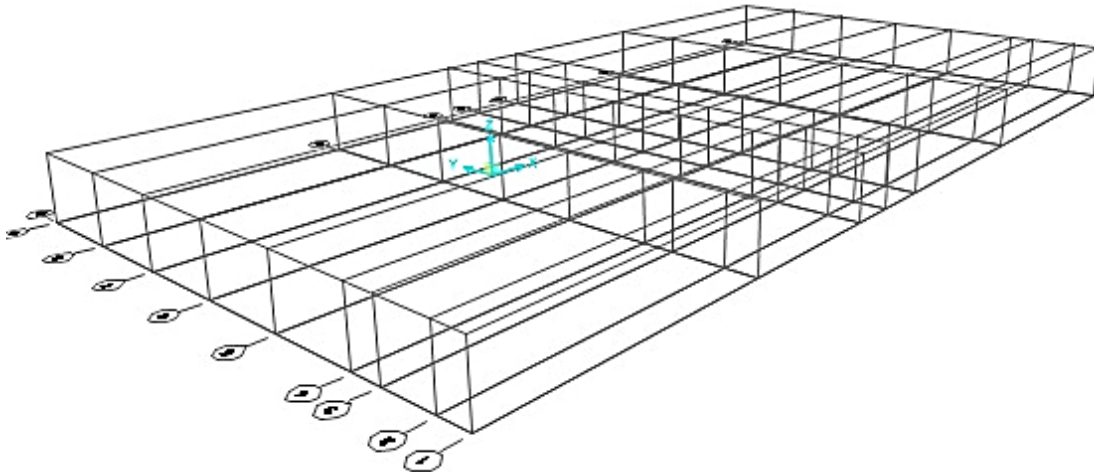


Figura 8. GRID o grilla

Una vez se tenga la GRID podemos iniciar a definir la ubicación de cada uno de los elementos que definen el diseño, todo esto debe hacerse teniendo en cuenta la ficha técnica de la teja para así mismo darle la separación adecuada entre vigas y templeteros de la estructura, en la Figura 9 se muestra la ubicación de los elementos que componen la cubierta metálica.

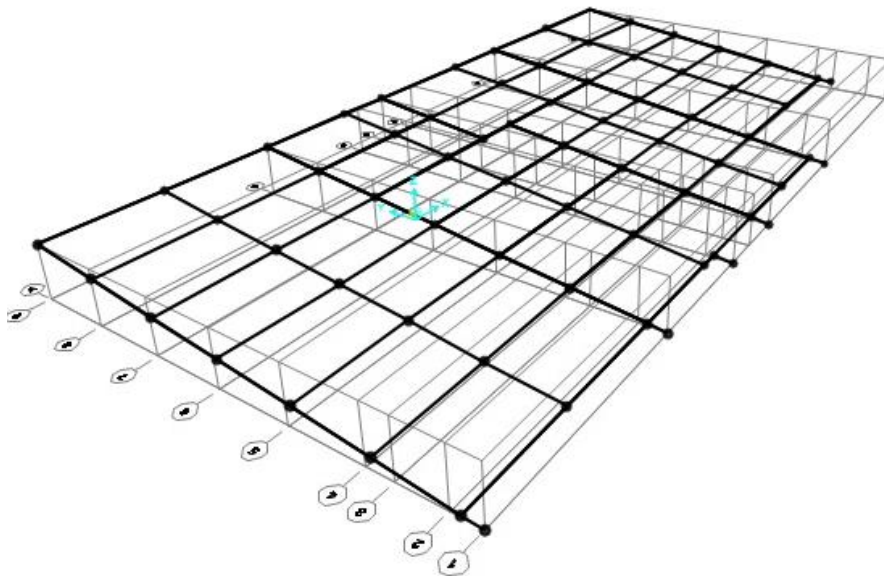


Figura 9 Definición de los elementos que componen el diseño.

Después de esto se deben definir los materiales que van a componer la cubierta tales como: concreto, mampostera y tubería de acero. En la Figura 10 se muestra el material definido para la cubierta el cual es un Acero A572 Grado 50.



Figura 10 Asignación de los materiales

El siguiente paso es asignar los tipos de apoyos, en la Figura 11 se muestran demarcados en color verde, que sufre la estructura, la cual se hace mediante la herramienta Assign Jion Restraints.

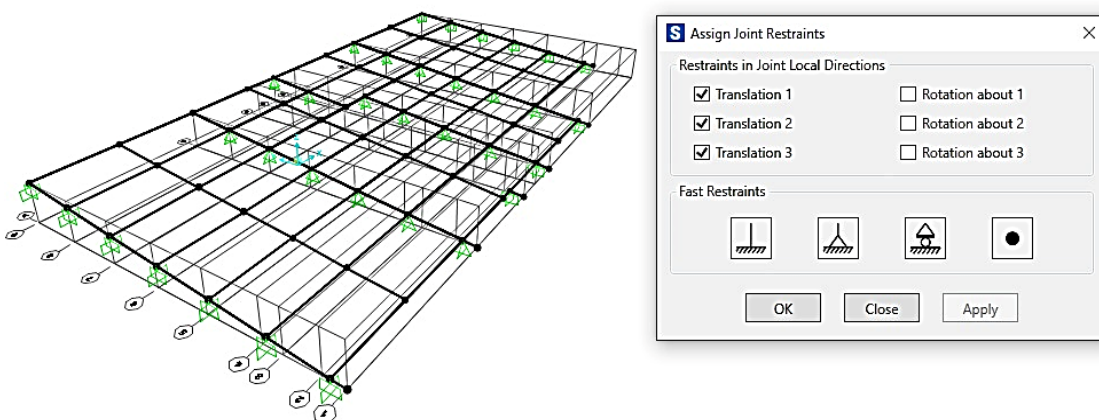


Figura 11 Asignación de los materiales

Cuando se tienen todas las ubicaciones de los apoyos y ejes, se pasa a definir la sección de los elementos la cual se hace mediante la herramienta Frame sections, donde se colocan los elementos que van a

componer la cubierta. Los elementos deben tener todas sus propiedades. En la Figura 12 se refleja cómo se debe realizar dicha asignación.

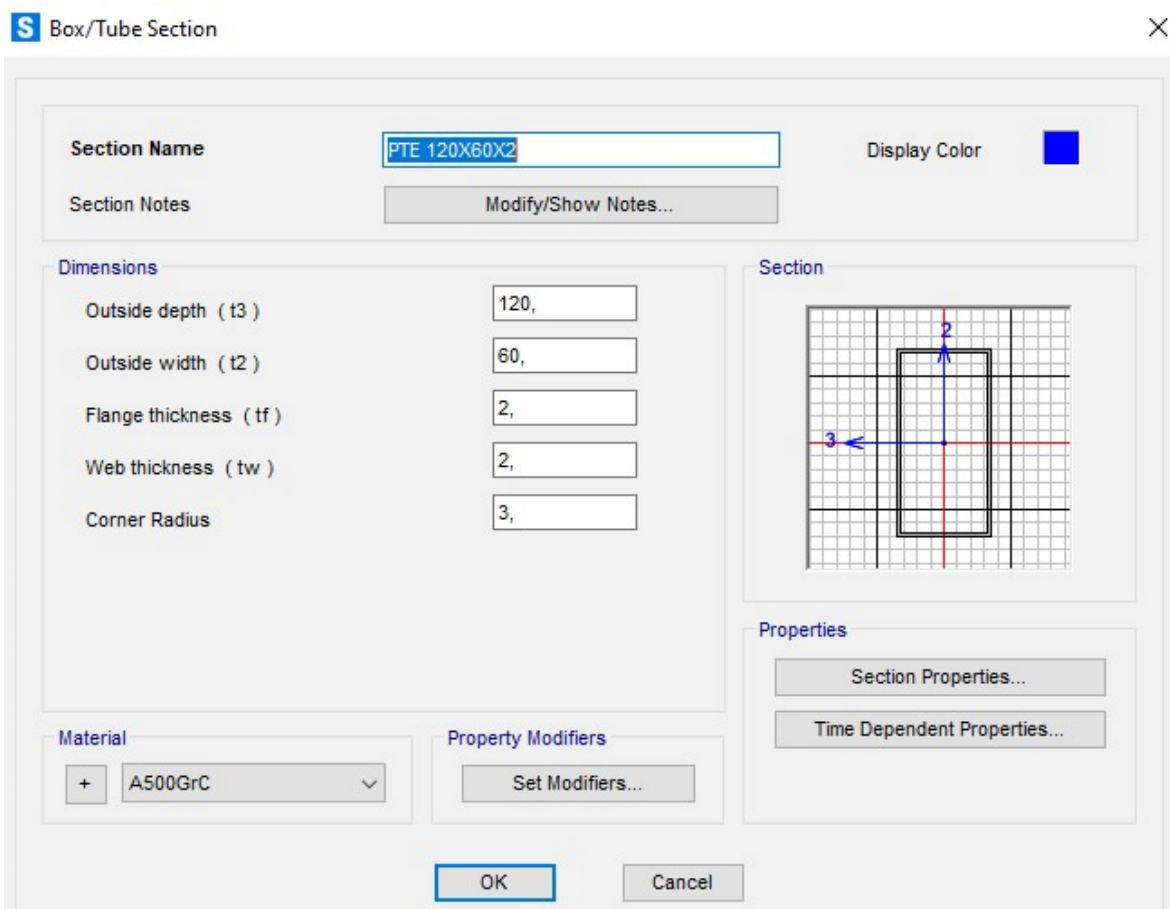


Figura 12 Definir los elementos y sección de cada uno de los elementos.

Para cada uno de los elementos que componen la cubierta debe de hacerse una asignación en cada parte de la cubierta donde están ubicados como se observa en la Figura 13.

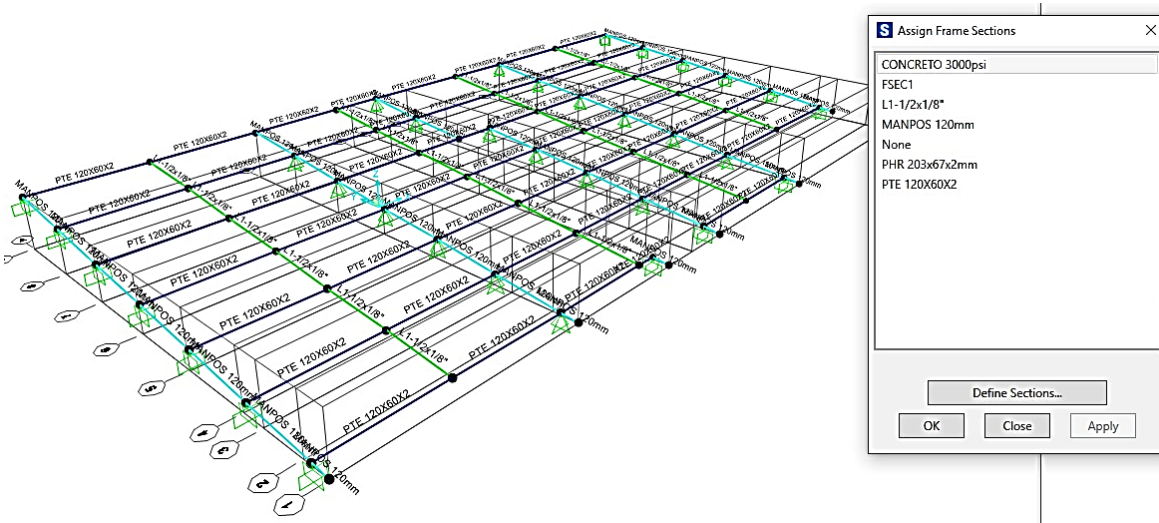


Figura 13 Ubicación de los elementos en la cubierta.

Para continuar, es necesario definir las cargas que se aplicarán a la estructura. El primer paso consiste en especificar la carga sísmica, la cual se determina mediante la función de espectros sísmicos. Esta función utiliza parámetros como **Av**, **Aa**, **Fa** y **Fv**, cuyos valores, específicos para la localidad de La Ceja, se presentan en las Tablas 7, 8 y 9. En la Figura 14 se define esta carga.

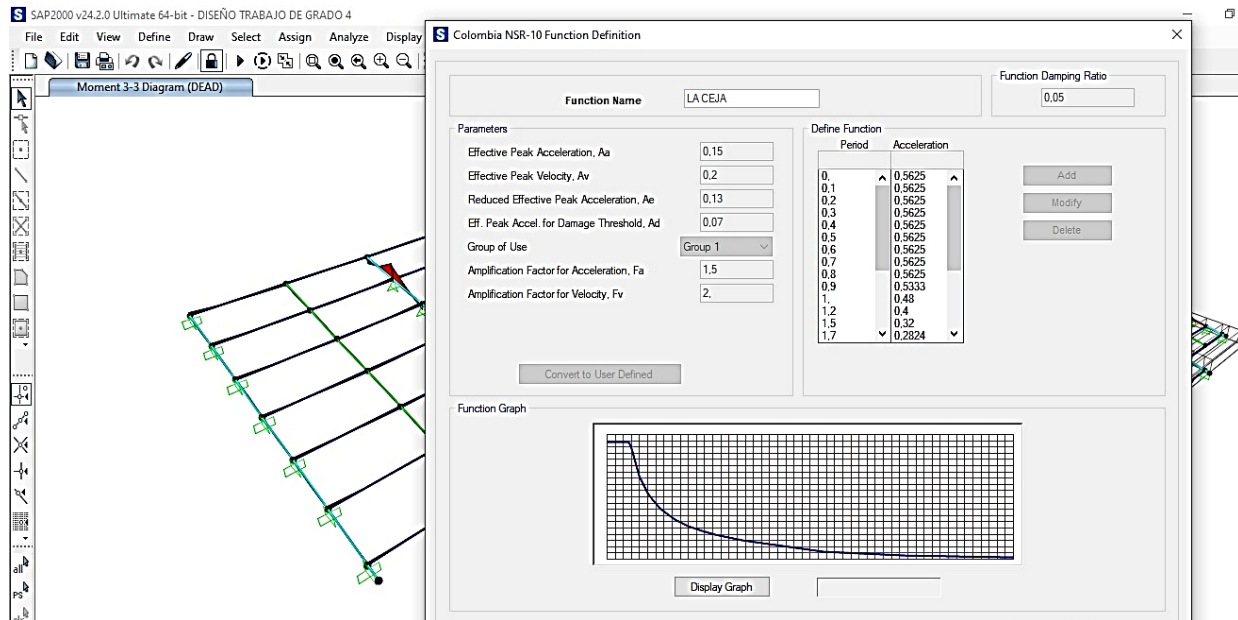


Figura 14 Definición de la carga sísmica.

En la Figura 15 se muestra cómo se definen las cargas que actúan sobre la estructura utilizando la herramienta *Define Loads*. Todas las cargas son ingresadas en el programa con sus respectivos valores y unidades.

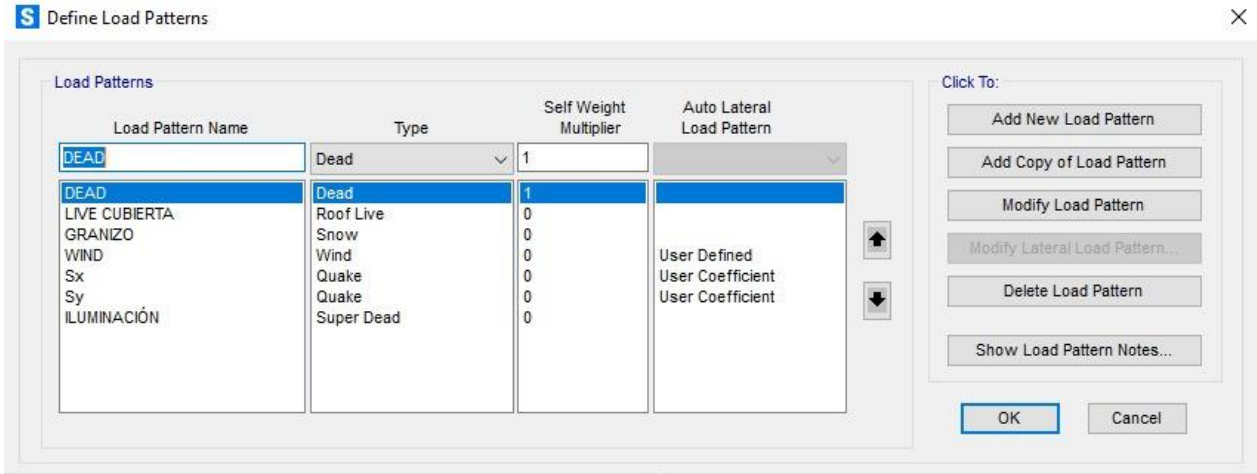


Figura 15 Definición de las cargas analizadas.

Para luego en la Figura 16 se realiza la demarcación de áreas de la cubierta mediante la herramienta *Área Loads Uniform to Frame*, a fin de asignar allí las cargas distribuidas uniformemente.

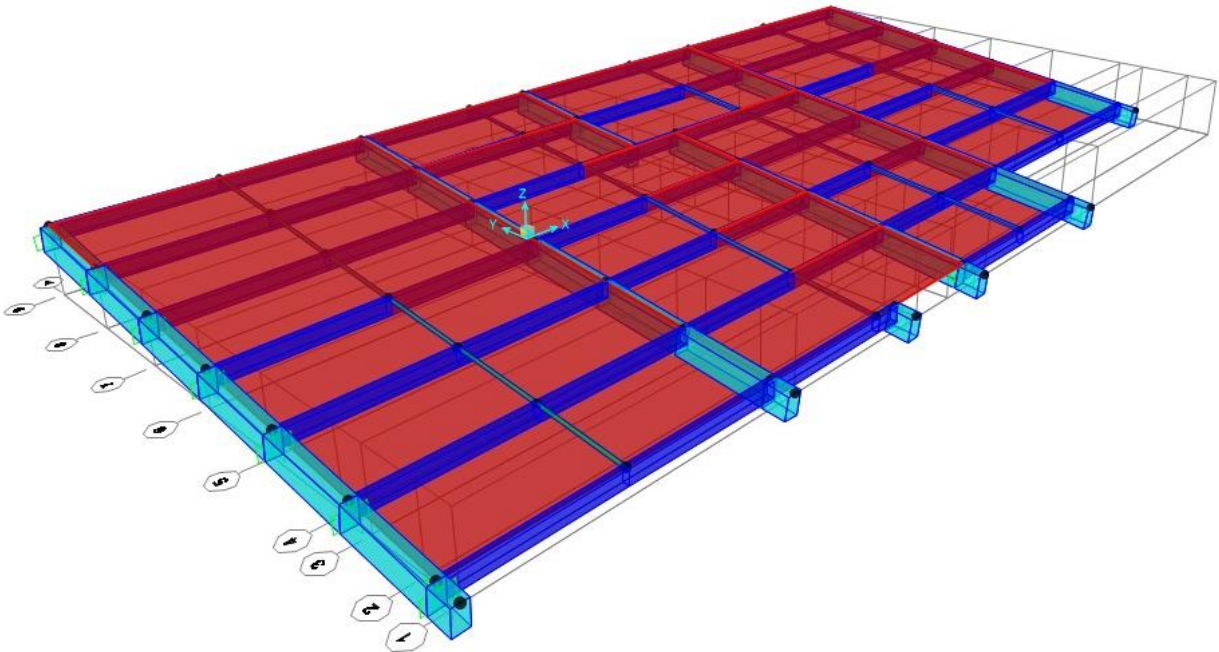


Figura 16 Cargas distribuidas sobre el área de la cubierta.

Ahora se procede a asignar de las cargas vivas, muertas, viento, sísmica y granizo para el área de cubierta, como se muestra en la Figura 17.

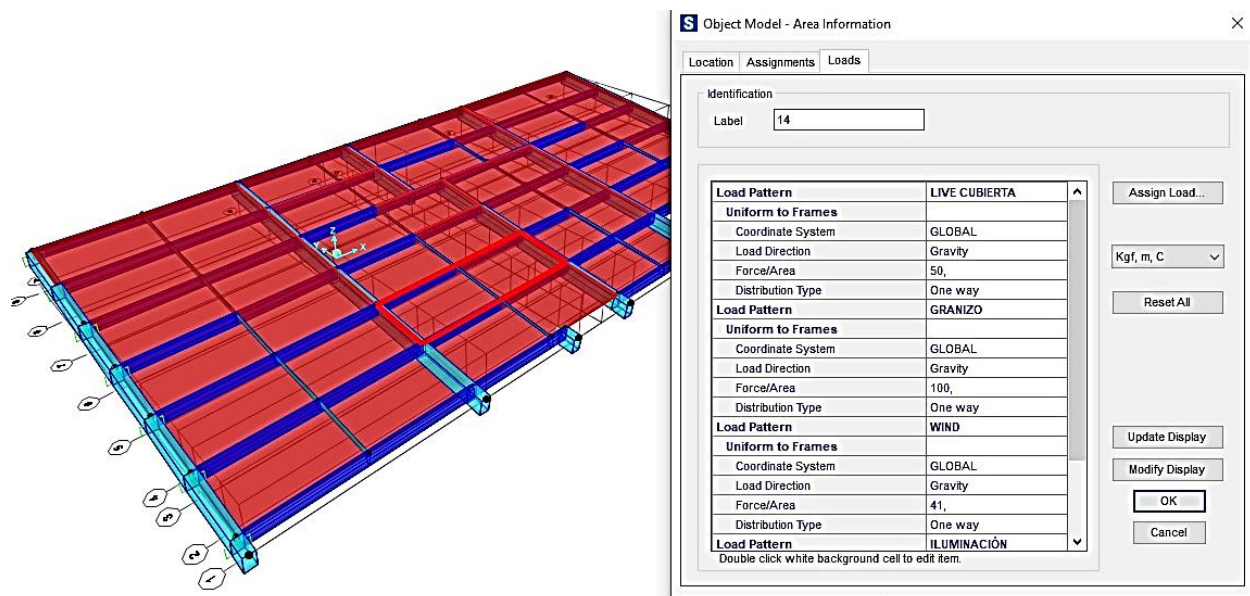


Figura 17 Asignación de las cargas analizadas.

Luego de esto en Tabla 16 se realiza las combinaciones de cargas analizando la deflexión. Las combinaciones utilizadas se toman de la NSR-10 título B.

D+F	(B.2.3-1)
D+H+F+L+T	(B.2.3-2)
D+H+F+(L_r ó G ó L_e)	(B.2.3-3)
D+H+F+0.75(L+T)+0.75(L_r ó G ó L_e)	(B.2.3-4)
D+H+F+W	(B.2.3-5)
D+H+F+0.7E	(B.2.3-6)
D+H+F+0.75W+0.75L+0.75(L_r ó G ó L_e)	(B.2.3-7)
D+H+F+0.75(0.7E)+0.75L+0.75(L_r ó G ó L_e)	(B.2.3-8)
0.6D+W+H	(B.2.3-9)
0.6D+0.7E+H	(B.2.3-10)

Tabla 16 combinaciones de carga para deflexiones.

En la Tabla 17 se realizan las combinaciones de cargas analizando esfuerzos. Las combinaciones utilizadas se toman de la NSR-10 título B.

$1.4(D+F)$	(B.2.4-1)
$1.2(D+F+T)+1.6(L+H)+0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)$	(B.2.4-2)
$1.2D+1.6(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)+(L \text{ ó } 0.8W)$	(B.2.4-3)
$1.2D+1.6W+1.0L+0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)$	(B.2.4-4)
$1.2D+1.0E+1.0L$	(B.2.4-5)
$0.9D+1.6W+1.6H$	(B.2.4-6)
$0.9D+1.0E+1.6H$	(B.2.4-7)

Tabla 17 combinaciones de carga para esfuerzos.

Ahora como se observa en la Figura 18 se ubica cada una de las combinaciones de cargas designándolas a su respectivo comportamiento según sean de deflexión o de esfuerzo.

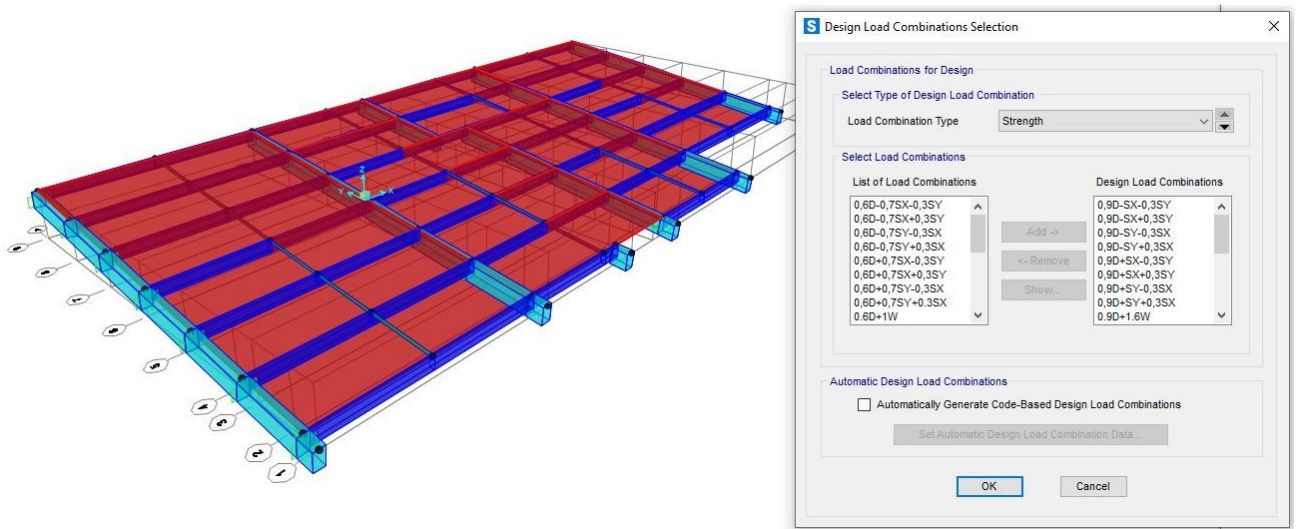


Figura 18. Designación de Combinaciones de cargas

Luego, se corre el programa una vez se tengan colocadas todas las cargas, combinaciones y materiales y se obtiene el resultado.

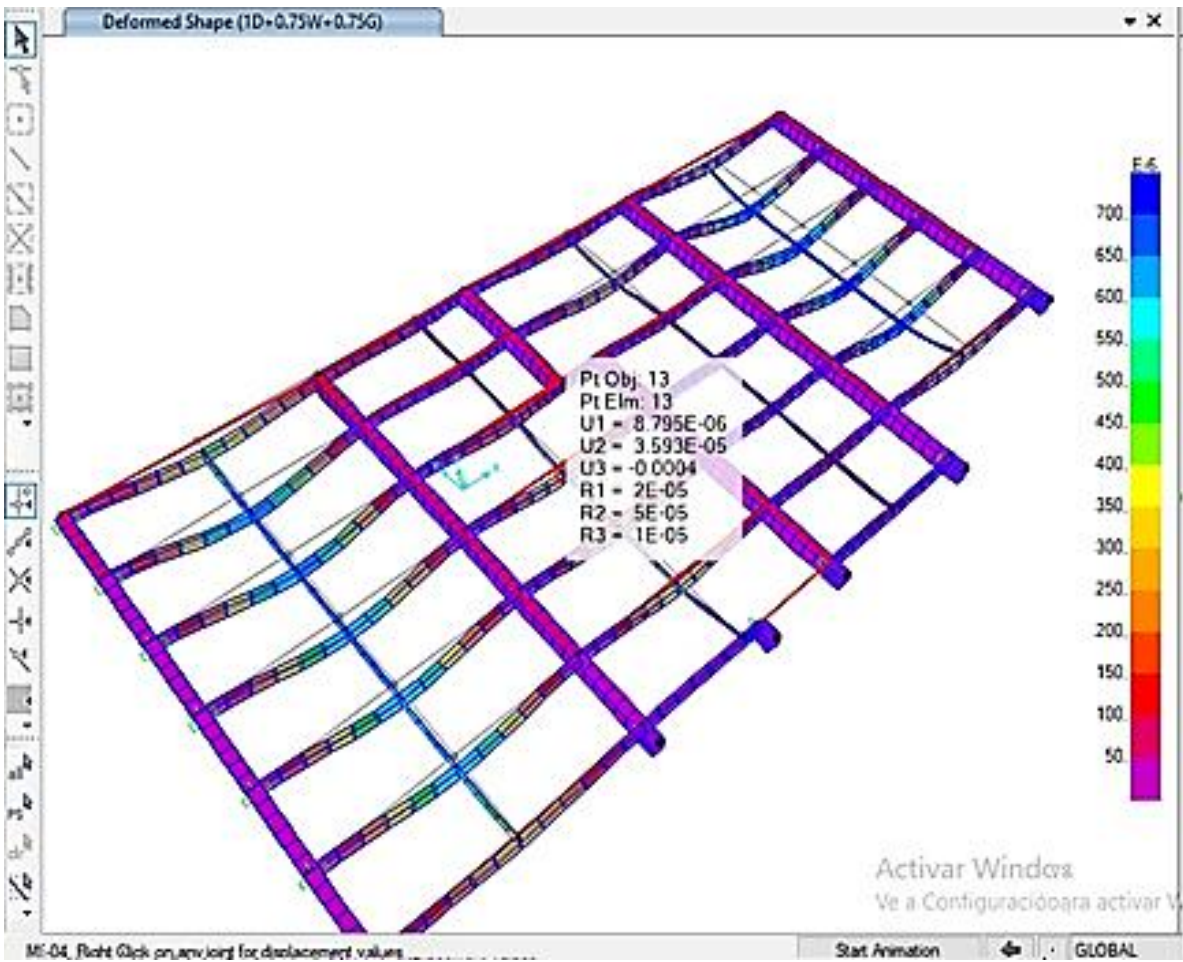


Figura 19. Desplazamiento en el eje Z.

Una vez corrida la simulación en la Figura 19 se ilustra que el desplazamiento del eje Z (U_3) es de menos de 1mm. A continuación, se muestran las cargas axiales, ver Figurar 20

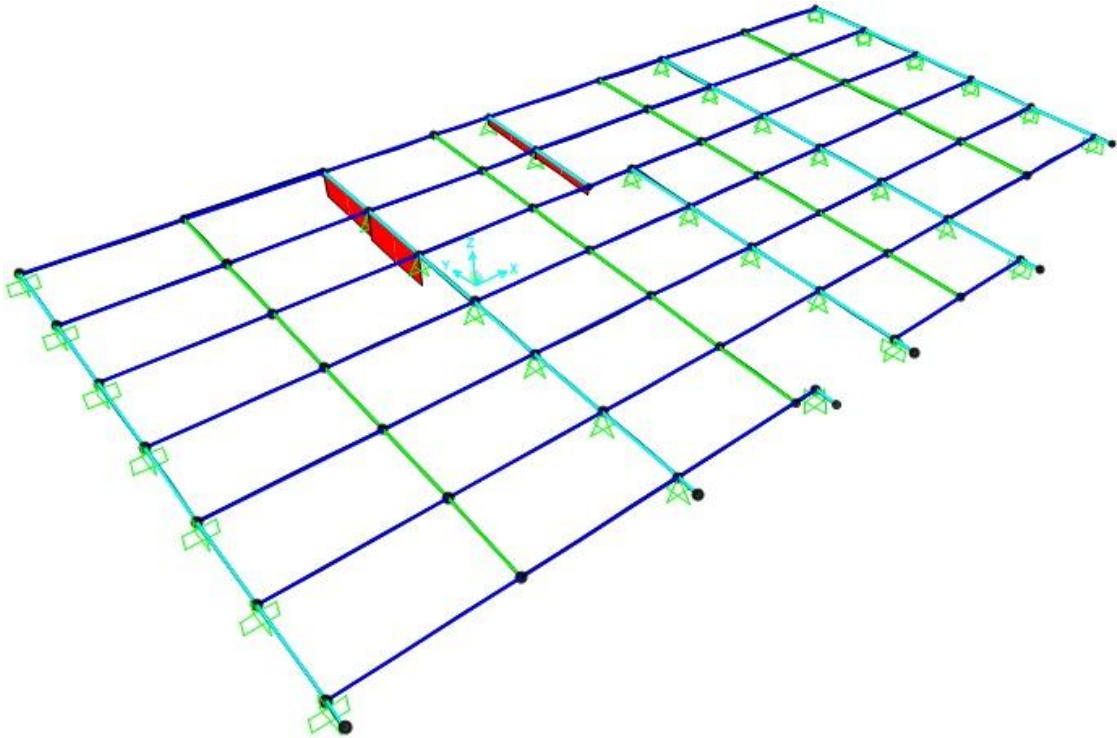


Figura 20. Cargas axiales de la cuarta parte de la cubierta

En la Figura 21 se muestra el diagrama de Cortantes en cada uno de los elementos.

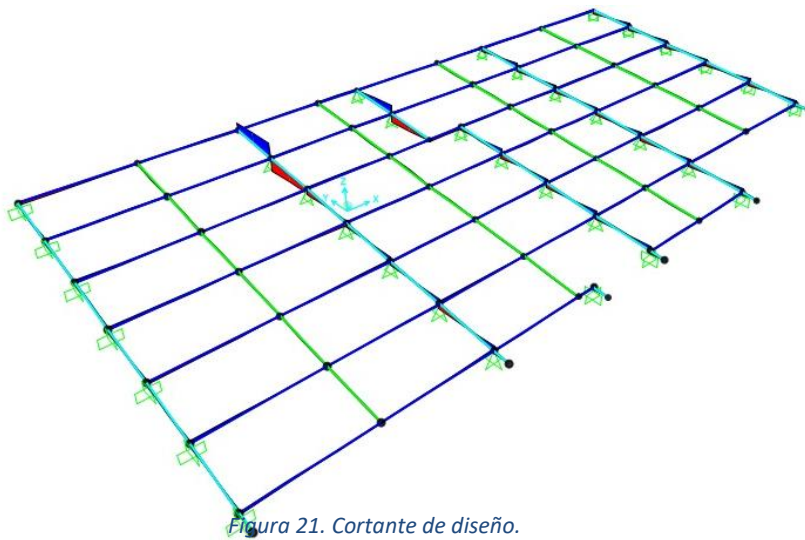


Figura 21. Cortante de diseño.

En la Figura 22 se muestra el diagrama de momentos en cada uno de los elementos.

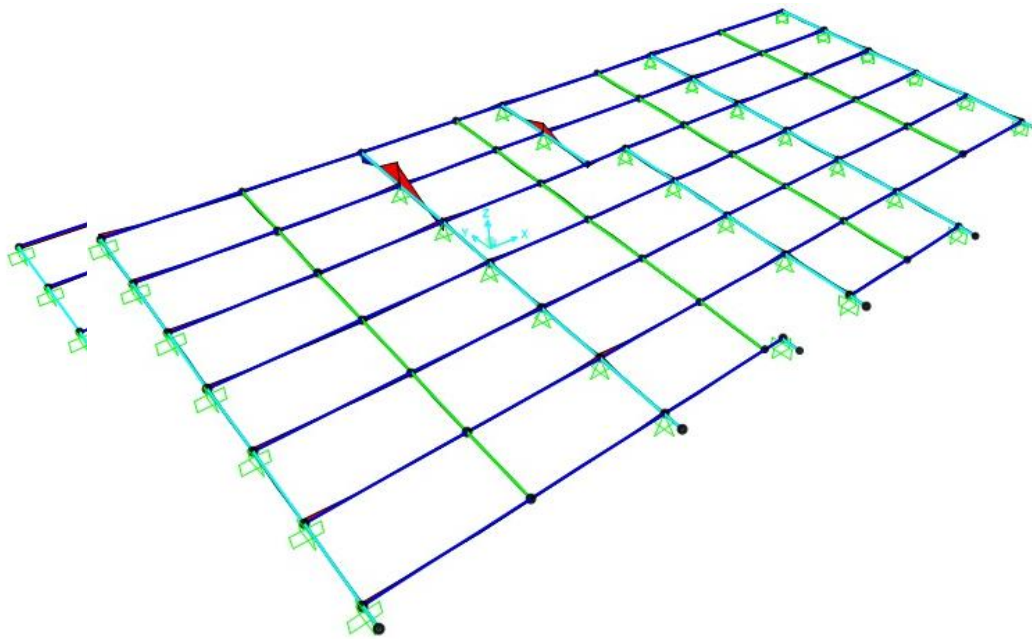


Figura 22. Momentos de diseño.

Reacciones

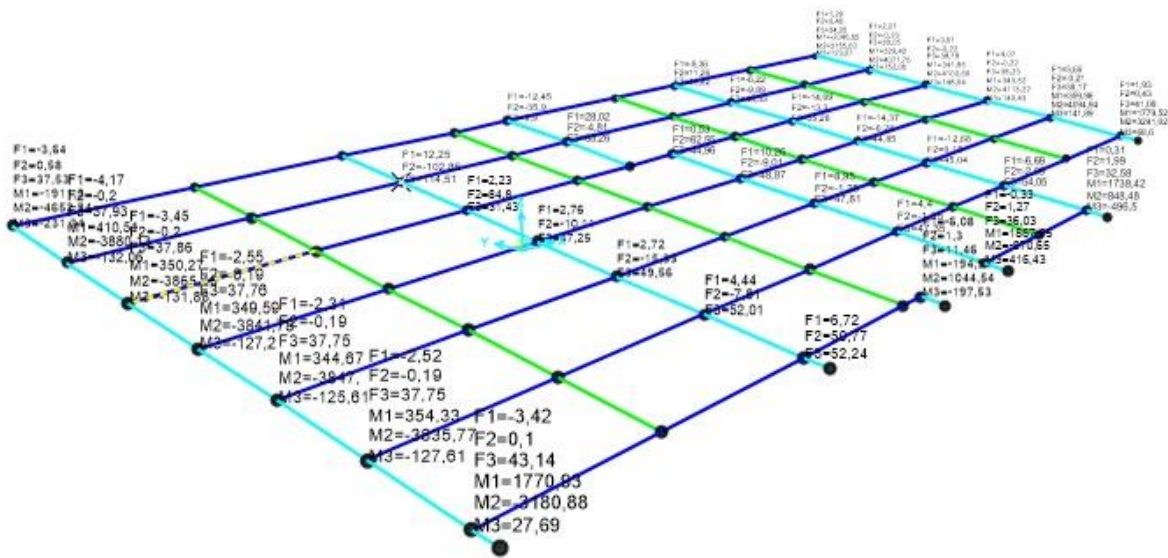


Figura 23. Reacciones del diseño en sus apoyos.

ANÁLISIS DE COSTOS

PESO DE LA ESTRUCTURA

En la Tabla 18 se presentan los resultados de la comparación en términos de peso y costos de mercado entre el perfil utilizado en el diseño original y el perfil propuesto para el nuevo diseño. El perfil propuesto ofrece una reducción del 34% en peso, lo que genera una diferencia significativa en costos. Esta disminución de peso permite un ahorro de \$2.944.102 pesos por cada torre instalada, y un valor de 32.383.355 por el total de la 11 cubierta, lo que representa una optimización considerable en la compra del material.

MATERIAL	PESO (Kg) 1 CUBIERTA	PORCENTAJE	PRECIO (Kg)	VALOR 1 CUBIERTA	VALOR 11 CUBIERTAS
PHR C 203x67x1.5mm	2121,8	100%	5.236	11.109.745	122.207.193
PTE 120x60x2mm	1406,2	66%	5.807	8.165.803	89.823.837
DIFERENCIA	715,6	34%	571	2.943.941	32.383.355

Tabla 18 valores de perfil y tubería

SECCIONES A RECUBRIR DE PINTURA

Para el siguiente análisis tenemos en cuenta el mismo esquema de pintura existente para el proyecto Arrayanes de San Sebastián el cual cuenta con una base anticorrosiva de 3mils de espesor y una base de acabado acrílica de mantenimiento de 3mils de espesor, en la Tabla 19 se muestra el valor de las áreas a recubrir según cada diseño.

Con las áreas a recubrir vamos definir las cantidades de anticorrosivo epoxico y acabado acrílico de mantenimiento negro Semi-mate, para la estructura inicial se debe aplicar una base anticorrosiva de 1,5mils de espesor por su cara interna antes del ensamble debido a las condiciones de infiltraciones de aguas que pueden corroer el material. Este proceso no se contempla en el diseño propuesto por lo tanto se ahorra el gasto de este.

en las Figura 24 Y Figura 25 mostramos el valor para cada pintura.

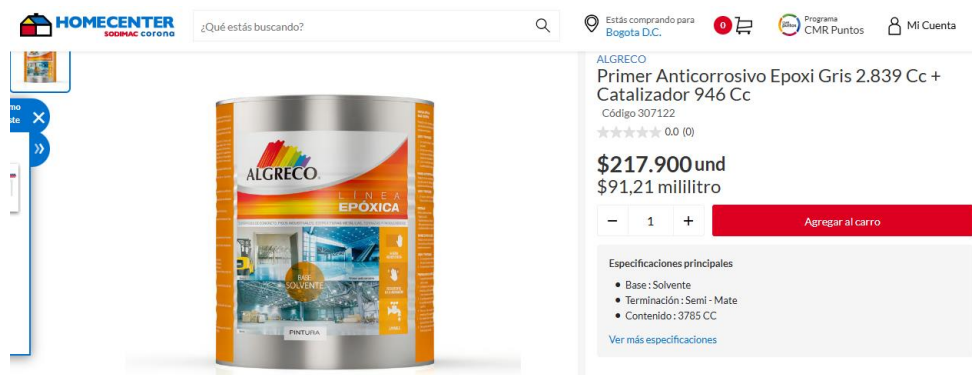


Figura 24. Precio de anticorrosivo epoxico.

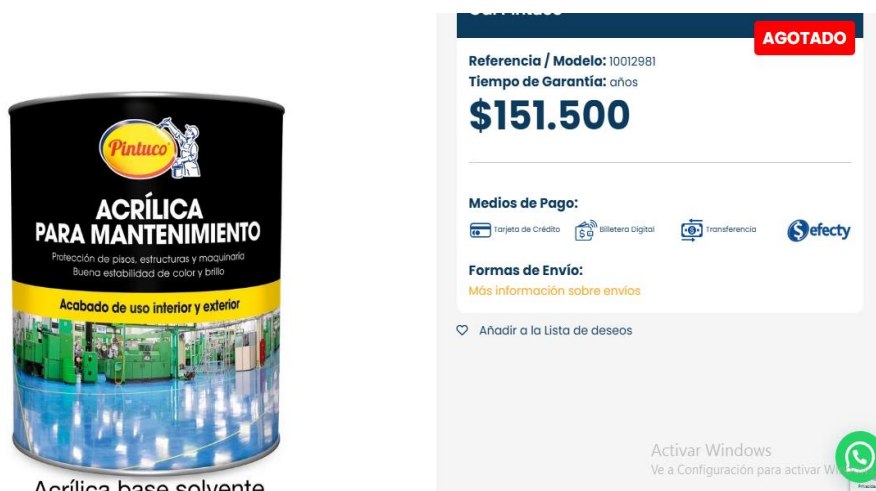


Figura 25. Precio de acabado acrílica mantenimiento.

En la Tabla 19 reflejamos el valor para los insumos de pintura para el recubrimiento de cada diseño teniendo una diferencia de \$56.751.910 entre el diseño existente y el propuesto. Donde podemos evidenciar el bajo consumo que este pudo tener.

CANTIDADES DE PINTURA (gal)					
DISEÑO	ANTICORROSIVO (gal)	ACABADO (gal)	VALOR ANTICORROSIVO	VALOR ACABADO	VALOR TOTAL 11 TORRES
INICIAL	20,4	13,6	4.441.186	2.058.558	71.497.176
PROPUESTO	3,6	3,6	790.716	549.763	14.745.266
				DIFERENCIA	56.751.910

Tabla 19 Valores de pintura para cada diseño.

FABRICACION EN PLANTA

La fabricación en planta es un proceso arduo y de mucha experticia para así mismo hacer un proceso más eficiente y eficaz, en este caso debido a que cada material existente PHRC 203X67X1,5 puesto en comparación con el propuesto PTE120X60X2. Podemos saltarnos unos pasos muy significantes para la fabricación de la cubierta de arrayanes de san Sebastián. Estos pasos los veremos en la Tabla 20 la cual cuenta muestra la información de las personas involucradas mostrando la cantidad de turnos en tiempo.

TIEMPOS DE FABRICACION EN PLANTA					
ARRAYANES DE SAN SEBASTIAN					
PROCESOS	OPERARIOS	ACTIVIDAD	TURNOS	TIEMPO (horas)	CANTIDAD
PINTURA	OFICIAL PINTOR	PROCESO DE ANTICORROSION INTERNO	1	9	84
	AUXILIAR PINTURA		1	9	
ARMADO	OFICIAL ARMADO	ENSAMBLE O ENSANDUCHADO DE PHRC	2	18	84/2
	AUXILIAR ARMADO		2	18	
SOLDADURA	SOLDADOR	SOLDADURA TARROS	2	18	42

Tabla 20 Personal por tiempo de producción.

Estos procesos son omitidos debido a que el material propuesto PTE120X60X2 es un material de sección continua específicamente rectangular la cual no debe tener un proceso de fabricación anterior para seguir con el proceso de armado. En la Tabla 21 se observa el costo de este proceso.

COSTO DE MANO DE OBRA				
OPERARIO	SALARIO + PRESTACIONES	VALOR HORA	CANTIDAD	VALOR TOTAL
OFICIAL PINTURA	3.200.000	13.333	99	1.320.000
OFICIAL ARMADO	4.800.000	20.000	198	3.960.000
SOLDADOR	4.000.000	16.667	198	3.300.000
AUXILIARES	2.400.000	10.000	297	2.970.000
			COSTO TOTAL	11.550.000

Tabla 21 Costo de mano de obra proceso diseño inicial.

MONTAJE

Se proyecta que el montaje de la estructura metálica del diseño propuesto no va a ser robusta ni pesada como la estructura del diseño inicial, además el proceso de pintura será aún más rápido debido a la que la estructura metálica tiene una sección menor. Se estima que la estructura puede tener una disminución del 20% del costo anterior de montaje. en la Tabla 22 se observa el costo de montaje de una cubierta de Arrayanes por personal y el tiempo que se llevaría para realizar dicho montaje.

TIEMPOS DE MONTAJE 1 CUBIERTA				
ARRAYANES DE SAN SEBASTIAN				
PROCESOS	OPERARIOS	ACTIVIDAD	TURNOS	TIEMPO (horas)
PINTURA	OFICIAL PINTOR	PROCESO DE PINTURA	6	54
	AUXILIAR PINTURA		6	54
MONTAJE	OFICIAL MONTAJE		15	135

	AUXILIAR 1 ARMADO	TRANSPORTE DE MATERIAL ENSAMBLE Y MONTAJE	15	135
	AUXILIAR 2 ARMADO		15	135
SOLDADURA	SOLDADOR	SOLDADURA	2	18

Tabla 22 personal y tiempo de montaje.

En la Tabla 23 se observa el valor por personal y tiempo que se lleva en la ejecución de montaje del Proyecto. La cual nos refleja un ahorro de \$15.312.000.

COSTO DE MANO DE OBRA				
OPERARIO	SALARIO + PRESTACIONES	VALOR HORA	CANTIDAD	VALOR TOTAL
OFICIAL PINTURA	3.200.000	13.333	594	7.920.000
OFICIAL ARMADO	4.800.000	20.000	1485	29.700.000
SOLDADOR	4.000.000	16.667	198	3.300.000
AUXILIARES	2.400.000	10.000	3564	35.640.000
		DISEÑO INICIAL	COSTO TOTAL	76.560.000
		DISEÑO PROPUESTO	COSTO TOTAL	61.248.000
		REDUCCION 20%	\$ 15.312.000	

Tabla 23 Costo de montaje

TRANSPORTE

Para el transporte de la estructura metálica de una cubierta se ejecuta con un viaje el cual el flete tiene un valor de \$180.960 contemplado en la Tabla 24, en el diseño inicial solo se podía transportar una cubierta por flete debido a sus dimensiones y peso para el diseño propuesto se pueden realizar en un solo flete llevar la estructura

metálica de 2 cubiertas por lo tanto, al proyecto costar de 11 cubiertas se pudo hacer 6 fletes reflejando un costo menor para el proyecto como lo podemos ver en la Tabla 25.

TRANSPORTE		
SBANETA - LA CEJA		
ITEM	CANTIDAD	VALOR
FLETE	1	\$ 180.960

Tabla 24 Costo de flete.

ITEM	FELTE	VALOR
DISEÑO INICIAL	11	\$ 1.990.560
DISEÑO PROPUESTO	6	\$ 1.085.760
DIFERENCIA	5	\$ 904.800

Tabla 25 ahorro en transporte.

COSTO DE INSUMO DE SOLDADURA

En la Tabla 26 se observa el ahorró en insumos de soldadura esto se debe a la aplicación del diseño paramétrico ya que al cambiar el material y su geometría ahorra un proceso en soldadura el cual era el “encajonar” el perfil del diseño inicial, este proceso no se realiza en el diseño propuesto debido a que el perfil escogido es un perfil continuo. El valor de omitir este proceso es equivalente a \$3.820.300 para la fabricación de las 11 cubierta e debe tener en cuenta los consumibles de soldadura los cuales también están contemplados en la Tabla 26.

COSTO DE INSUMOS SOLDADURA			
ITEM	VALOR	CANTIDAD	VALOR TOTAL
SOLDADURA	\$ 159.900	11	\$ 1.758.900
CONSUMIBLES EQUIPOS SOLDADURA	\$ 150.000	11	\$ 1.650.000

ELEMENTOS PROTECCION	\$ 37.400	11	\$ 411.400
		COSTO	\$ 3.820.300

Tabla 26 Costo insumos de soldadura.

REDUCCION DE COSTO

Para arrayanes de san Sebastián podemos calcular un valor de \$126.752.322 el cual pudo ser un ahorro significativo para la obra. En la Tabla 27 se realiza una tabla comparativa entre el diseño inicial y el diseño propuesto donde se ven reflejados todos los ítems en el cual se obtuvo una reducción significativa. En las columnas donde aparece la nomenclatura N/A significa que para el diseño propuesto no se tuvo que contemplar dicho ítem.

REDUCCION DE COSTO			
ARRAYANES DE SAN SEBASTIAN			
ITEM	DISEÑO INICIAL	DISEÑO PROPUESTO	DIFERENCIA
PESO	\$ 122.207.193	\$ 89.823.837	\$ 32.383.356
PINTURA	\$ 71.497.176	\$ 14.745.266	\$ 56.751.910
FABRICACION EN PLANTA	\$ 11.550.000	N/A	\$ 11.550.000
MONTAJE	\$ 76.560.000	\$ 61.248.000	\$ 15.312.000
TRANSPORTE	\$ 1.990.560	\$ 1.085.760	\$ 904.800
SOLDADURA	\$ 3.820.300	N/A	\$ 3.820.300
IMPREVISTOS 5%	\$ 6.029.956	\$ 6.029.956	\$ 6.029.956
		TOTAL REDUCCION	\$ 126.752.322

Tabla 27 Tabla comparativa entre diseño inicial y el diseño propuesto..

CONCLUSIONES:

El uso excesivo de materiales en la construcción eleva significativamente los costos, lo cual resulta especialmente preocupante en proyectos de vivienda de interés social, donde el control de gastos es fundamental para garantizar su accesibilidad. Además, reducir este desperdicio no solo permite una construcción más racional y económica, sino que también contribuye a optimizar los recursos disponibles.

Desde una perspectiva ambiental, el uso innecesario de materiales intensifica la extracción de recursos naturales, genera mayores cantidades de residuos y aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto contradice los principios de sostenibilidad, especialmente relevantes en proyectos destinados a beneficiar a comunidades vulnerables.

La implementación de un enfoque de diseño paramétrico permitió ajustar y optimizar el diseño estructural al evaluar múltiples alternativas, como cambios en los materiales y la geometría. Este enfoque, apoyado en herramientas de modelado avanzado como SAP200, facilitó la creación y análisis del diseño propuesto, verificando su viabilidad técnica y económica. Además, permitió adaptar el diseño de manera eficiente a las nuevas condiciones derivadas de las modificaciones en la obra civil, optimizando el uso de materiales, los costos y el rendimiento.

REFERENCIAS

- AISC (2021). *Steel Construction Manual*. American Institute of Steel Construction.
- ASCE 7 (2020). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers.
- Baker, J., et al. (2022). *Structural Design and Analysis: Advanced Methods*. Springer.
- CSI (2023). *SAP2000: Structural Analysis Program*. Computers and Structures, Inc.
- <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- Eurocódigo 1 (2005). *Acciones en Estructuras*. Comité Europeo de Normalización.
- Froese, T., et al. (2021). *Construction Cost Estimating*. Wiley.
- <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/6676ca8f-26d5-4342-99f0-f59bcbc3ad52/content>
- Jones, C., et al. (2022). *Cost-Benefit Analysis in Structural Engineering*. Taylor & Francis.
- F. Villegas, et al. (2012). Shape Optimization of 2D parametric models based on geometric weighting and evolutionary rules
- https://www.scipedia.com/public/Villegas_Gutierrez_2012a
- Fernández Saiz M. et al. (2016). DISEÑO PARAMETRICO COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL
- https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/18826/JAIE_008.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Oxman, R. (2017). *Theoretical and Practical Aspects of Parametric Design*. MIT Press.
- Smith, T., et al. (2023). *Engineering Cost Analysis and Management*. Elsevier.
- El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR 10