

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Viabilidad estructural de bodegas autoportantes comparadas con naves  
industriales convencionales

Trabajo de graduación presentado por María Rosa Castañaza Mejía para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala,

2024



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Viabilidad estructural de bodegas autoportantes comparadas con naves  
industriales convencionales


Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
María Rosa Castañaza Mejía para optar al grado académico de Licenciado  
en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala,


2024



Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Álvaro Córdova

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Álvaro Córdova

(f)   
Ing. Hugo Pallais

(f)   
Ing. Danilo Rodríguez

- Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de enero de 2025.

# CONTENIDO

|   | Página |
|---|--------|
| <b>LISTA DE CUADROS</b> . . . . .                           | VIII   |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> . . . . .                           | XI     |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> . . . . .                            | XIII   |
| <b>RESUMEN</b> . . . . .                                    | XV     |
| <b>ABSTRACT</b> . . . . .                                   | XVI    |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> . . . . .                            | 1      |
| <b>II. ANTECEDENTES</b> . . . . .                           | 2      |
| <b>III. JUSTIFICACIÓN</b> . . . . .                         | 3      |
| <b>IV. OBJETIVOS</b> . . . . .                              | 4      |
| A Objetivo general . . . . .                                | 4      |
| B Objetivos específicos . . . . .                           | 4      |
| <b>V. MARCO TEÓRICO</b> . . . . .                           | 5      |
| A Logística 4.0 . . . . .                                   | 5      |
| B Importancia del almacenamiento en la industria . . . . .  | 5      |
| 1 Técnicas de almacenamiento . . . . .                      | 6      |
| 2 Tipos de almacenamiento . . . . .                         | 7      |
| C Naves industriales . . . . .                              | 7      |
| 1 Características de las naves industriales . . . . .       | 8      |
| 2 Tipos de naves industriales . . . . .                     | 8      |
| 3 Elementos de una nave industrial . . . . .                | 9      |
| D ¿Qué es una bodega autoportante? . . . . .                | 11     |
| E Principales elementos de la bodega autoportante . . . . . | 12     |
| 1 Puntales: . . . . .                                       | 12     |
| 2 Diagonales: . . . . .                                     | 12     |
| 3 Bastidores: . . . . .                                     | 12     |
| 4 Largueros: . . . . .                                      | 13     |
| 5 Estantes: . . . . .                                       | 14     |
| 6 Travesaños: . . . . .                                     | 14     |
| 7 Atirantados: . . . . .                                    | 14     |
| 8 Distanciador: . . . . .                                   | 14     |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| F          | Unidad de carga   | 15        |
| G          | Diferencias entre naves industriales convencionales y bodegas autoportantes | 15        |
|            | 1 Área de construcción:   | 15        |
|            | 2 Capacidad de almacenaje:  | 16        |
|            | 3 Fuerzas sísmicas:   | 16        |
|            | 4 Tiempo de ejecución:  | 16        |
|            | 5 Mantenimiento:  | 16        |
| H          | Propiedades físico-mecánicas del acero                                      | 16        |
|            | 1 Plasticidad:  | 17        |
|            | 2 Fragilidad:   | 17        |
|            | 3 Maleabilidad:   | 17        |
|            | 4 Dureza:   | 17        |
|            | 5 Tenacidad:  | 17        |
|            | 6 Esfuerzos residuales  | 17        |
| I          | Conexiones de acero   | 18        |
|            | 1 Tipos de conexiones de acero LFRD   | 18        |
| J          | Software especializado de cálculo estructural                               | 19        |
|            | 1 ETABS   | 19        |
| K          | Códigos de diseño   | 20        |
|            | 1 AGIES NSE 2-18:   | 20        |
|            | 2 ANSI MH16.3-2016 (RMI)  | 28        |
|            | 3 AISI 2017:  | 33        |
|            | 4 AISC360-16:   | 34        |
| <b>VI.</b> | <b>METODOLOGÍA</b>  | <b>38</b> |
| A          | Recopilación de datos   | 38        |
| B          | Definición de la geometría de la estructura y propiedades de las conexiones | 39        |
| C          | Solicitaciones de cargas gravitacionales y de viento                        | 40        |
| D          | Solicitaciones de carga sísmica   | 41        |
| E          | Fuerzas sísmicas  | 44        |
| F          | Modelo estructural  | 45        |
| G          | Asignación de cargas y espectro sísmico                                     | 50        |
| H          | Verificación de derivas   | 52        |
| I          | Combinaciones de carga  | 53        |
| J          | Capacidad de sistemas estructurales   | 54        |
| K          | Volteo  | 54        |
| L          | Torsión   | 55        |
| M          | Interpretación de resultados  | 55        |
| N          | Entregables   | 56        |
|            | 1 Presupuesto   | 56        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> . . . . .         | <b>58</b> |
| <b>VIII. CONCLUSIONES</b> . . . . .                  | <b>67</b> |
| <b>IX. RECOMENDACIONES</b> . . . . .                 | <b>68</b> |
| <b>X. BIBLIOGRAFÍA</b> . . . . .                     | <b>69</b> |
| <b>XI. APÉNDICES</b> . . . . .                       | <b>71</b> |
| <b>A Propiedades de los materiales</b> . . . . .     | 71        |
| <b>B Integración de cargas</b> . . . . .             | 73        |
| <b>C Integración de masa sísmica</b> . . . . .       | 73        |
| <b>D Integración de carga de viento</b> . . . . .    | 75        |
| <b>E Espectro sísmico</b> . . . . .                  | 80        |
| <b>F Cortante basal Caso 1</b> . . . . .             | 85        |
| <b>G Cortante basal Caso 2</b> . . . . .             | 88        |
| <b>H Cortante basal Caso 3</b> . . . . .             | 91        |
| <b>I Verificación de derivas</b> . . . . .           | 94        |
| <b>J Chequeo desplazamientos de viento</b> . . . . . | 100       |
| <b>K Volteo</b> . . . . .                            | 103       |
| <b>L Torsión</b> . . . . .                           | 105       |

## LISTA DE CUADROS

| Cuadro |  | Página |
|--------|--|--------|
| 1      | Selección típica de aceros al carbono y de aleación para varias aplicaciones | 16     |
| 2      | Tabla 3-1 NSE2-18  | 21     |
| 3      | Tabla 3-1 NSE2-18  | 23     |
| 4      | Tabla 4.2.2-1 NSE2-18  | 25     |
| 5      | Tabla 3-1 NSE2-18  | 27     |
| 6      | Tabla 2.7.2.2.3 ANSI MH16.3-2016   | 32     |
| 7      | Propiedades mecánicas SS Gr55 ASTI011  | 46     |
| 8      | Propiedades mecánicas HSLAS-F GR501  | 47     |
| 9      | Sistema estructural NSE 7.5  | 50     |
| 10     | Cortante basal bodega autoportante   | 51     |
| 11     | Cortante basal bodega autoportante caso 2                                    | 52     |
| 12     | Cortante basal bodega autoportante caso 3                                    | 52     |
| 13     | Cortante basal bodega autoportante   | 53     |
| 14     | Verificación de derivas de viento caso 1,2,3                                 | 53     |
| 15     | Integración precio Nave Industrial   | 56     |
| 16     | Integración precio Bodega Autoportante                                       | 56     |
| 17     | Comparación nave industrial vs bodega autoportante                           | 57     |
| 18     | Comparación momento último   | 65     |
| 19     | Comparación momento último   | 66     |
| 20     | Comparación momento último   | 66     |

## LISTA DE FIGURAS

| Ilustración   | Página |
|---|--------|
| 1 Imagen representativa de la deformación de una zapata . . . . .               | 10     |
| 2 Imagen representativa de perfiles doblados en frío . . . . .                  | 11     |
| 3 Imagen representativa de la fuerza en cada nodo de la armadura . . . . .      | 11     |
| 4 Imagen representativa de la cubierta de una nave industrial. . . . .          | 12     |
| 5 Imagen representativa de los bastidores de una bodega autoportante. . . . .   | 13     |
| 6 Imagen representativa del larguero de una bodega autoportante . . . . .       | 14     |
| 7 Imagen representativa del atirantado de una estantería . . . . .              | 14     |
| 8 Tarima . . . . .  | 15     |
| 9 Imagen representativa de esfuerzos a tensión y compresión . . . . .           | 17     |
| 10 Imagen representativa de diagrama de esfuerzos . . . . .                     | 18     |
| 11 Imagen representativa de la relación entre el momento y la rotación. . . . . | 19     |
| 12 Mapa de zonificación por viento NSE2-18 . . . . .                            | 22     |
| 13 Zonificación sísmica para la república de Guatemala . . . . .                | 24     |
| 14 Espectro sísmico . . . . .   | 27     |
| 15 Grilla para modelado . . . . .   | 39     |
| 16 Área tributaria . . . . .  | 42     |
| 17 Caso 1: capacidad al 100 % isométrico . . . . .                              | 42     |
| 18 Caso 1: capacidad al 100 % planta . . . . .                                  | 42     |
| 19 Caso 2: ocupación de los últimos 3 niveles . . . . .                         | 43     |
| 20 Caso 3: capacidad al 50 % planta . . . . .                                   | 43     |
| 21 Masa adicional costaneras . . . . .  | 44     |
| 22 Espectro sísmico . . . . .   | 45     |
| 23 Perfil U122 . . . . .  | 46     |
| 24 Propiedades Perfil U122 . . . . .  | 47     |
| 25 Perfil U96 415 G . . . . .   | 47     |
| 26 Viga 150x50mm . . . . .  | 48     |
| 27 Viga 150x50mm . . . . .  | 48     |
| 28 Costanera 2x8x1.8mm . . . . .  | 49     |
| 29 Costanera 2x8x1.8mm . . . . .  | 49     |
| 30 Modelo bodega autoportante . . . . .   | 50     |
| 31 Derivas para evaluación de torsión . . . . .                                 | 55     |
| 32 Deformación combinación CR6 . . . . .  | 59     |
| 33 Deformación combinación CR6 . . . . .  | 59     |
| 34 Chequeo de diseño dinámico de puntales . . . . .                             | 60     |
| 35 Chequeo de diseño dinámico de vigas . . . . .                                | 61     |
| 36 Chequeo de diseño dinámico de diagonales . . . . .                           | 62     |
| 37 Chequeo de diseño dinámico de columnas . . . . .                             | 62     |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 38 | Chequeo de diseño dinámico de vigas           | 63 |
| 39 | Chequeo de diseño dinámico de diagonales      | 63 |
| 40 | Chequeo de diseño dinámico de columnas        | 64 |
| 41 | Chequeo de diseño dinámico de vigas           | 64 |
| 42 | Chequeo de diseño dinámico de diagonales      | 65 |
| 43 | ASTM A1011 HSLAS Grade 55                     | 71 |
| 44 | Perfil UI22                                   | 71 |
| 45 | ASTM A1011 SS Grade 50                        | 72 |
| 46 | ASTM A1011 SS Grade 50                        | 72 |
| 47 | ASTM A1011 SS Grade 50                        | 73 |
| 48 | Cálculo de 500 cajas de lápiz Mongol          | 73 |
| 49 | Cálculo carga de 500 cajas de lápiz Mongol    | 74 |
| 50 | Integración cargas de viento                  | 75 |
| 51 | Integración cargas de viento                  | 76 |
| 52 | Integración cargas de viento                  | 77 |
| 53 | Integración cargas de viento                  | 78 |
| 54 | Integración cargas de viento                  | 79 |
| 55 | Integración cargas de viento                  | 80 |
| 56 | Integración cargas de viento                  | 80 |
| 57 | Parámetros espectro sísmico                   | 81 |
| 58 | Espectro sísmico                              | 82 |
| 59 | Espectro sísmico                              | 83 |
| 60 | Gráfico de pseudoaceleración                  | 84 |
| 61 | Gráfico de pseudodesplazamientos              | 84 |
| 62 | Datos para la obtención de cortante basal     | 85 |
| 63 | Datos para la obtención de cortante basal     | 85 |
| 64 | Análisis modal espectral                      | 86 |
| 65 | Análisis modal espectral dirección Y          | 86 |
| 66 | Análisis modal espectral dirección Y          | 87 |
| 67 | Calibración de diseño AGIES                   | 87 |
| 68 | Calibración primera corrida ETABS             | 87 |
| 69 | Comparativa cortante basal                    | 87 |
| 70 | Datos caso 2 para obtención de cortante basal | 88 |
| 71 | Análisis modal dirección Y                    | 88 |
| 72 | Análisis modal dirección X                    | 89 |
| 73 | Calibración diseño AGIES                      | 90 |
| 74 | Calibración primera corrida ETABS             | 90 |
| 75 | Factor de calibración                         | 90 |
| 76 | Comparativa cortante basal                    | 90 |
| 77 | Datos caso 3 para obtención de cortante basal | 91 |
| 78 | Análisis modal dirección Y                    | 91 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 79  | Análisis modal dirección X              | 92  |
| 80  | Calibración diseño AGIES                | 93  |
| 81  | Calibración primera corrida ETABS       | 93  |
| 82  | Factor de calibración                   | 93  |
| 83  | Comparativa cortante basal              | 93  |
| 84  | Verificación derivas caso 1             | 94  |
| 85  | Verificación derivas caso 1             | 95  |
| 86  | Verificación derivas caso 2             | 96  |
| 87  | Verificación derivas caso 2             | 97  |
| 88  | Verificación derivas caso 3             | 98  |
| 89  | Verificación derivas caso 3             | 99  |
| 90  | Desplazamiento de viento caso 1         | 100 |
| 91  | Desplazamiento de viento caso 2         | 101 |
| 92  | Desplazamiento de viento caso 3         | 102 |
| 93  | Cortante para volteo caso 1 dirección x | 103 |
| 94  | Cortante para volteo caso 1 dirección y | 103 |
| 95  | Cortante para volteo caso 2 dirección x | 103 |
| 96  | Cortante para volteo caso 1 dirección y | 104 |
| 97  | OTM caso 1 dirección x                  | 104 |
| 98  | OTM caso 1 dirección y                  | 104 |
| 99  | OTM caso 2 dirección x                  | 105 |
| 100 | OTM caso 2 dirección y                  | 105 |
| 101 | Derivas para torsión caso 1 x           | 105 |
| 102 | Derivas para torsión caso 1 y           | 106 |
| 103 | Derivas para torsión caso 2 y           | 106 |
| 104 | Derivas para torsión caso 3 x           | 106 |
| 105 | Derivas para torsión caso 3 y           | 106 |



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios;

A mi familia, por ser mi motivación y apoyo incondicional;

A mi asesor de tesis, Álvaro Córdova, por su dedicación y por compartir su conocimiento conmigo;

A todas las personas que han sido parte fundamental de este trabajo, quiero dedicar estas páginas con profundo agradecimiento.

## RESUMEN

En la actualidad, la logística juega un papel clave en la satisfacción del mercado. Esto, considerando que cada vez es más importante que una empresa comercializadora de productos, insumos o incluso materia prima sea capaz de monitorear y rastrear sus insumos en orden de garantizar una entrega eficiente que satisfaga las necesidades del cliente de forma oportuna. Por lo que se vuelve una necesidad el planificar una bodega que cuente con estructuras altamente especializadas que permitan aprovechar el espacio de cada unidad de carga, además de crear mayor utilidad de tiempo, promoviendo un manejo prudente de los sistemas de inventarios.

Los avances tecnológicos de la industria de la construcción logran adaptar las necesidades en materia de logística de la empresa a fin de maximizar la capacidad de acopiamiento sin sacrificar la infraestructura de la bodega. Las bodegas autoportantes son la solución ante las demandas logísticas que satisfacen el triángulo de calidad en la ejecución de proyectos. Esto, considerando que el emplear acero reduce entre 40 % a 50 % los tiempos de obra comparado con los métodos constructivos convencionales, lo que genera una reducción de costos considerable (Arilla, 2021).

En las naves industriales convencionales, las estanterías únicamente proveen soporte para el almacenamiento de la mercadería. En el caso de las bodegas autoportantes, las estanterías también tienen una función estructural para soportar cargas gravitacionales y laterales, como viento y sismo. Por lo tanto, se considera fundamental corroborar la viabilidad técnica de diseñar dicho tipo de bodega a fin de disminuir la amenaza del colapso de la estructura ante la cual están expuestos los usuarios, especialmente durante un evento sísmico. Esto, a través de la aplicación de normas vigentes locales que generen escenarios donde los riesgos son manejados de manera responsable, minimizando las pérdidas materiales y, sobre todo, protegiendo la vida de los involucrados.

Este trabajo se centra en el diseño de una bodega autoportante en el municipio de la ciudad de Guatemala, considerando las demandas estructurales para su dimensionamiento y las condiciones de sitio conforme a las normas vigentes de Guatemala. Se identificaron las cargas gravitacionales de la siguiente forma: la carga muerta por cerramiento y peso propio de la estructura, la carga viva de la cubierta por mantenimientos preventivos y la unidad de almacenamiento con sus respectivas dimensiones.

Se evaluó las presiones de viento y fuerzas sísmicas por medio de un modelo en el programa informático ETABS 20 para el análisis estructural. Los resultados, se compararon con la nave industrial convencional con condiciones similares de carga, misma ubicación y tipo de suelo diseñada por Jorge Andersson en su trabajo de graduación denominado *Análisis y diseño estructural de una nave industrial mediante métodos numéricos y simulaciones 3D* elaborado en 2021. Adicionalmente, se definieron unidades de almacenamiento con

distintas ubicaciones estratégicas para crear efectos críticos en la respuesta gravitacional y sísmica de la estructura, como por ejemplo la bodega ocupada bajo las siguientes condiciones: un 100 %, 50 % de la capacidad de almacenamiento y 50 % extremo posterior.

## ABSTRACT

Currently, logistics plays a key role in market satisfaction. This is considering that it is increasingly important for a company that markets products, supplies, or even raw materials to be able to monitor and track its inputs in order to ensure efficient delivery that meets customer needs in a timely manner. Therefore, it becomes essential to plan a warehouse that has highly specialized structures to optimize the space of each load unit, while also creating greater time utility, promoting prudent management of inventory systems.

Technological advancements in the construction industry are able to adapt the logistics needs of the company to maximize storage capacity without sacrificing the warehouse infrastructure. Autoportant warehouses are the solution to logistical demands that satisfy the quality triangle in project execution. This is considering that using steel reduces construction times by 40 % to 50 % compared to conventional building methods, resulting in considerable cost savings (Arilla, [2021](#)).

In conventional industrial buildings, shelves only provide support for storing goods. In the case of autoportant warehouses, the shelves also have a structural function to support gravitational and lateral loads, such as wind and seismic forces. Therefore, it is crucial to verify the technical feasibility of designing such a warehouse in order to reduce the risk of structural collapse that users are exposed to, especially during a seismic event. This is achieved through the application of current local standards that create scenarios where risks are managed responsibly, minimizing material losses and, above all, protecting the lives of those involved.

This work focuses on the design of an autoportant warehouse in the municipality of Guatemala City, considering the structural demands for its sizing and site conditions in accordance with current regulations in Guatemala. Gravitational loads were identified as follows: dead load from enclosure and the weight of the structure, live load from the roof for preventive maintenance, and the storage unit with its respective dimensions.

Wind pressures and seismic forces were evaluated using a model in the SAP2000 software for structural analysis. The results were compared with a conventional industrial building under similar load conditions, same location, and soil type designed by Jorge Andersson in his graduation project titled *Analysis and Structural Design of an Industrial Warehouse Using Numerical Methods and 3D Simulations*, completed in 2021. Additionally, storage units were defined with different strategic locations to create critical effects on the gravitational and seismic response of the structure, such as the warehouse occupied under the following conditions: 100%, 50% storage capacity, 50% rear extreme.

**Keywords:** logistics, self-supporting warehouse, structural design and seismic resistance

## I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito industrial contemporáneo, la elección adecuada de la estructura de almacenamiento es fundamental para optimizar la logística y mejorar la eficiencia operativa de las empresas. Las naves industriales han evolucionado significativamente, adaptándose a las crecientes demandas del mercado y a los avances tecnológicos. Dentro de esta evolución, las bodegas autoportantes se destacan por ofrecer múltiples ventajas que las hacen altamente competitivas en comparación con las naves industriales convencionales.

Una de las principales características de las bodegas autoportantes es su costo accesible. Al estar construidas con una estructura metálica ensamblada, se reduce notablemente el tiempo de ejecución, lo que también se traduce en una disminución significativa del costo de la mano de obra. Además, su diseño flexible permite adaptarse a distintos tamaños y configuraciones, eliminando restricciones siempre que se cumplan las normativas vigentes. Sin mencionar, que de ser necesario, se pueden dismantelar y reubicar sin volver a incurrir en el mismo costo inicial.

Al comparar las bodegas autoportantes con las naves industriales convencionales, se destaca su capacidad de almacenaje, resistencia a fuerzas sísmicas y tiempos de ejecución reducidos. Las bodegas autoportantes pueden alcanzar alturas de hasta 40 metros, optimizando el uso del terreno y permitiendo una mayor capacidad de almacenamiento al eliminar elementos estructurales innecesarios. Esto se traduce en un enfoque más eficiente y seguro para las operaciones logísticas, lo que resulta crucial en un mercado en constante evolución.

En este trabajo, se analizaron en profundidad las características, ventajas y elementos estructurales de las bodegas autoportantes, así como su viabilidad en el contexto de la ciudad de Guatemala cumpliendo con los requerimientos de las normativas vigentes locales NSE y AISC, y se determinó que para las dimensiones y ubicación formuladas en el trabajo de graduación *Análisis y diseño estructural de una nave industrial mediante métodos numéricos y simulaciones 3D* elaborado en 2021 por Jorge Andersson, la opción más rentable en términos de costos y viabilidad estructural es la nave industrial convencional, adquiriendo de forma independiente el sistema de almacenamiento. Además, se buscó identificar el caso de distribución de la unidad de carga más crítico en términos de volteo y torsión, en donde se identificó que el caso 2, el cual está al 50 % de la capacidad de almacenamiento, posee un factor de seguridad más cercano al momento de resistencia.

## II. ANTECEDENTES

En el ámbito de la ingeniería estructural, la optimización del diseño de naves industriales es un tema de creciente interés, especialmente en lo que respecta a la eficiencia en el uso de materiales y la resistencia ante cargas diversas. Por lo que para realizar un análisis comparativo en términos de peso de una nave industrial convencional con una bodega autoportante, se empleó la nave industrial diseñada por Jorge David Andersson Recinos en el 2021 como trabajo de investigación para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil denominado *Análisis y diseño estructural de una nave industrial mediante métodos numéricos y simulaciones 3D*.

Su investigación, se enfocó en el análisis y cálculo estructural de una nave industrial, diseñando cada uno de los componentes que la conforman, con el objetivo de lograr secciones eficientes. El trabajo incluye un análisis teórico de la estructura, siguiendo las directrices de la American Society of Civil Engineers (ASCE) y las pautas del American Institute of Steel Construction (AISC). Andersson, empleó el software de análisis estructural ETABS para crear un modelo matemático de la nave. El diseño está orientado a la Ciudad de Guatemala, considerando las demandas estructurales y las condiciones específicas del sitio, aplicando las *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 2*. Realizó un cálculo matricial utilizando el método de rigidez para un marco en 2D, optando por perfiles W y se utilizaron aceros estructurales A36, A572 y A992. Además, verificó que cada sección cumpliera con los parámetros de diseño y requisitos sísmicos. También, investigó cuál es el sistema más adecuado para el diseño de naves industriales, considerando opciones como marcos a momento, marcos arriostrados y marcos concéntricos. Finalmente, modeló el diseño de la nave industrial utilizando ETABS y llevó a cabo una comparación de las metodologías empleadas (Andersson, 2021).

### III. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en Guatemala el sector industrial se ha mantenido en un crecimiento constante del 5.5 % anual. Mientras que, en la ciudad en comparación con el año 2019, el número de bodegas construidas ha aumentado en un 11 %, según un estudio sobre el mercado del sector de bodegas generado por la Gremial de Bodegas adscrita a la Cámara de Industria de Guatemala (CIG) (Periódico Digital Centroamericano y del Caribe -PDCC-, 2022). Lo anterior, evidencia que el sector industrial y la necesidad de almacenamiento, en parte debido al crecimiento exponencial del *e-commerce*, se encuentra en desarrollo constante de una manera saludable. Otra prueba de ello, son el surgimiento de proyectos a gran escala como la construcción de la Zona Empresarial el Naranjo, el cual es un complejo de ofibodegas y área de comercio que cuenta con un presupuesto de \$8,000,000.00 y un área destinada al almacenaje de 27,363,898 m<sup>2</sup> (CentralAmericaData, 2021).

Cabe mencionar que el sector de bodegas en Guatemala se encuentra constituido por 5,633 bodegas diversas, predominando sectores del sur de la ciudad como Villa Nueva, Villa Canales y San Miguel Petapa, en dicho sector predominan los parques industriales en parte por la reducción de costos operativos y logísticos, lo que les permite generar más de 30,000 empleos indirectos y directos (Gándara, 2019). Debido a la proliferación de este tipo de proyectos, surgen nuevos retos en la construcción industrial, en donde es necesario implementar alternativas que incrementen la productividad del giro de negocio. Aun más, que garanticen una ejecución dentro de los parámetros de costo, tiempo y calidad, y que, al mismo tiempo, cumplan con las solicitudes estructurales requeridas por las autoridades federales, estatales y municipales.

Las bodegas autoportantes surgen como una alternativa para rentabilizar y automatizar al máximo los espacios dedicados al almacenaje. Sin mencionar que al componerse de acero, reducen la huella de carbono generada por la fabricación de cemento, el cual contribuye con el 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (El Troudi, 2022). La innovación de este tipo de bodegas ha generado una aceptación a nivel mundial como Turquía, Brasil y Lituania con zonas sísmicas similares a Guatemala. A nivel nacional, un claro ejemplo es la construcción del almacén autoportante de Latin Farma en Guatemala a causa de la necesidad de almacenar mayores cantidades de fármacos. Actualmente, en Europa han empleado las normativas UNE-EN 15512:2010 y UNI-EN 16681 para el diseño de estanterías de almacenaje de Moët & Chandon. Mientras que en Turquía han usado la normativa TSE 12167 y TSE 500 para el diseño del centro logístico Hayat Kimya en Izmit. Por el otro lado, en América del Sur optan por emplear normativas como NTC 5689 y NSR-10, las cuales contemplan especificaciones de diseño y ensayos para sistemas de almacenamiento. Las mismas, desprecian las estrategias de diseño centradas en las condiciones sísmicas (Natali, 2020).

Es por ello, que se confirma la necesidad de analizar el sistema estructural de una bodega autoportante bajo cargas sísmicas que cumpla con las normativas vigentes locales e internacionales como: NSE, ASCE y AISC, IBC y FEMA. El sistema fue evaluado bajo las condiciones de sitio de la ciudad de Guatemala, específicamente para la integración de las cargas de viento y sismo. Asimismo, se buscó comparar este sistema con las naves industriales convencionales para intentar apegarse a las prácticas constructivas locales y verificar la viabilidad estructural y rentabilidad.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Analizar la viabilidad estructural de una bodega autoportante ubicada en el municipio de Guatemala comparada con una nave industrial convencional, cumpliendo ambas con los requerimientos de las normativas vigentes locales NSE, ASCE y AISC.

### **B. Objetivos específicos**

- Realizar un análisis comparativo en términos de peso de ambas tipologías estructurales para determinar si la bodega autoportante es estructuralmente y logísticamente viable y competitiva.
- Analizar y verificar una bodega autoportante y una nave industrial convencional sometidas a las mismas cargas, condiciones de sitio y con geometrías similares.
- Determinar el estado de carga viva que genera el efecto más crítico en la respuesta gravitacional y sísmica de una bodega autoportante.

## V. MARCO TEÓRICO

### A. Logística 4.0

La logística 4.0 es definida por Jeschke (2016) como el conjunto de fases sucesivas en la intervención de miembros independientes que se encuentran relacionados a fin de obtener datos que sean de provecho para aumentar la productividad de la empresa. En otras palabras, dicha logística hace referencia a la inserción de la tecnología en la gestión de la cadena de suministro de la misma logrando, en la mayoría de los casos, integrar mecanismos ciber físicos a sistemas de almacenamiento y logística. Lo anterior, con el objetivo de incrementar la eficiencia y el rendimiento del proceso, desde la introducción de materia prima hasta la entrega del producto al consumidor (González, 2020).

Dicha logística 4.0, se encuentra estrechamente relacionada con los avances generados en la cuarta Revolución Industrial. La misma, surge por la eminente necesidad de satisfacer al cliente con un servicio de calidad caracterizado por ser puntual, rápido y eficaz, y que, si en dado caso surgiera un inconveniente, el pedido sea capaz de ser trazado de forma continua. Para ello, la logística 4.0 emplea el *Big Data* o, en otras palabras, obtiene datos masivos para el flujo constante de información referente a las operaciones logísticas que realiza.

Definitivamente, el invertir en la automatización de las operaciones logísticas permite, además de reducir los costes operativos, minimizar el riesgo generado por el factor humano. También, al obtener por medio del *Internet of Thing (IoT)* información que puede ser gestionada en tiempo real, aumenta la precisión y velocidad de las operaciones en donde interviene la identificación de los productos. Lo anterior, genera un almacenaje eficiente con mejor control de inventario, además de personal con horario optimizado (Baena, 2023).

Cabe mencionar, que los cambios sociales ocasionados por la evolución tecnológica tienen un impacto sobre la logística fomentando el almacén 4.0. Un claro ejemplo de ello, es el cambio estructural de tiendas posicionadas de manera estratégica según la ubicación de los clientes potenciales a centros de distribución automatizados situados a las afueras de la urbanización. Esto, genera un impacto en la operación de la bodega, puesto que se deben establecer plazos de entrega al igual que su alcance, prever la materia prima, estimar el flujo de mercancía, y sobre todo, considerar rotaciones elevadas. Es por ello, que en ocasiones se debe evaluar la factibilidad de la bodega convencional o bien diseñar un nuevo tipo de almacén que satisfaga las necesidades de almacenamiento y que al mismo tiempo, permita una rotación eficiente (González, 2020).

### B. Importancia del almacenamiento en la industria

El almacenamiento se define como el conjunto de técnicas o procedimientos llevados a cabo para guardar y conservar artículos evitando su deterioro desde el momento de su producción hasta que es solicitado por el consumidor. Además de la acción intrínseca de guardar la mercancía, el almacenamiento en la industria también abarca la recepción de los productos, el mantenimiento de estos a través de la gestión eficiente, la toma de inventario

exitosa y la gestión de preparación, embalaje y envío a la dirección concordada con el cliente (Remisa, 2021).

Por lo tanto, el almacenamiento juega un papel preponderante en el sistema global de manejo de materiales, específicamente en la cadena de suministro puesto que permite satisfacer las necesidades del cliente al entregar un producto de forma rápida y según las solicitudes del mismo, lo cual posiciona al comercio por delante de la competencia. Por ende, un almacenamiento efectivo puede ser el precursor de una futura expansión del negocio.

El gestionar las instalaciones, el equipo, el personal como también las técnicas indispensables para garantizar el almacenaje eficiente de la materia prima, productos en proceso y terminados permite facilitar las tareas administrativas. Al posibilitar las mismas, aumenta las utilidades del negocio por medio del control efectivo de los flujos de mercancía fusionando estrategias en donde interviene el mercadeo, la planeación y producción (Vélez, 2020).

Otro aspecto a mencionar es que la administración de almacenamiento efectiva reduce los costos de transporte, puesto que al controlar de mejor manera el inventario se deben realizar menos viajes asociados con imprecisiones en el suministro y la demanda. También, los almacenes permiten tener disponibilidad inmediata del producto, lo cual disminuye el tiempo de reparto y la entrega, por ende, es menor.

Entre las recomendaciones para el almacenamiento óptimo, se puede mencionar la aplicación de *software* computacional y sistemas de gestión que permiten realizar el seguimiento de inventario de forma precisa, también facilita las gestiones relacionadas con órdenes de compra y venta, además de que mejora los procesos de *packing* y *picking*. También, es necesario que los trabajadores se encuentren directamente familiarizados con el almacenamiento, puesto que al estar involucrados en primera línea facilita identificar si las soluciones logísticas se adaptan de manera correcta. Por último, es importante realizar auditorías de mantenimiento para identificar áreas de mejora específicamente relacionadas con el sistema de almacenamiento actual, los procesos y procedimientos respectivos (Logycom, 2022).

**1. Técnicas de almacenamiento.** En orden de promover un almacenamiento eficiente, se emplean las siguientes técnicas:

a. Agrupar los productos similares: facilita la conservación y localización según características.

b. Almacenamiento de los productos verticalmente: esto, a través de estanterías diseñadas según las especificaciones de las unidades de carga.

c. Almacenamiento de fácil alcance: se debe almacenar la mercancía de modo que los productos manejados con mayor frecuencia sean accesibles.

d. Los productos de mayor peso deben almacenarse en la parte inferior o al nivel de la cintura del operario para evitar lesiones causadas por el esfuerzo físico requerido para movilizar las cajas.

e. Facilitar la localización de cada producto al establecer una ubicación diferente para cada uno.

f. Emplear drones para identificar fácilmente los productos que se encuentran colocados erróneamente, lo cual podría causar accidentes dentro del almacén.

g. Almacenar los productos según la clase de movimiento: con el objetivo de facilitar al máximo la manipulación de la mercancía, se deben agrupar en un determinado lugar a fin de reducir los tiempos de carga.

h. Técnicas de automatización de movimientos: se recomienda emplear sistemas automáticos como lanzaderas, brazos de recogida o incluso carruseles que reducen tiempos en operaciones con poco valor añadido de los empleados (Capera, 2021).

**2. Tipos de almacenamiento.** Entre los tipos de almacenamiento más comunes, destacan los siguientes:

a. Almacenamiento interno o cubierto: a través de dicho tipo de almacenamiento se puede proteger de mejor manera los productos de variables climáticas como la temperatura, humedad o incluso iluminación.

b. Almacenamiento externo: a diferencia del almacenamiento interno, el almacenamiento externo obstaculiza la protección de la mercancía ante variables climáticas, ya que se encuentra al aire libre.

c. Almacenamiento central: según la cadena logística, el almacenamiento central se encuentra ubicado cerca de la planta de producción a fin de regular el costo de transporte de productos.

d. Almacenamiento regional: a diferencia del almacenamiento central, el almacenamiento regional se encuentra lejano a la planta de producción, por lo que es necesario transportar la mercancía en camiones.

e. Almacenamiento en tránsito: se emplean para productos de alta rotación en donde la mercancía se debe preparar para su envío en poco tiempo.

f. Almacenamiento temporal: hace referencia a un espacio acondicionado, en donde se cubren las necesidades de *stock* por tiempo limitado (Capera, 2021).

### C. Naves industriales

Desde la Revolución Industrial, las naves industriales hacen referencia a las estructuras metálicas de acero que son empleadas en distintos sectores de la industria para realizar actividades de almacenaje, producción, distribución y manufactura. Las mismas, hacen referencia a edificaciones de uso no residencial que están compuestas por una estructura conformada principalmente de acero. Por el otro lado, posee elementos secundarios que actúan en conjunto al ser diseñados con parámetros especiales.

Cabe mencionar que, en conformidad con el *Metal Building System Manual*, los pórticos rígidos de una luz además de poseer cubiertas de baja pendiente, sus anchos totales no su-

peran los 36 metros junto con una altura promedio de hasta 10 metros. Al no tener apoyos intermedios, facilita la distribución de los espacios. Las mismas, son de rápido montaje y fabricación, por lo que su versatilidad permite que tengan un impacto medioambiental bastante reducido al igual que su costo (EIGO Construcciones, 2018).

**1. Características de las naves industriales.** Las naves industriales son estructuras que poseen las siguientes características:

a. Posee facilidad para cumplir con demandas estructurales respetando las más altas exigencias de calidad y seguridad.

b. Costo accesible, esto considerando que al ser una estructura de metal ensamblada el tiempo de ejecución es menor, sin mencionar que se reduce notablemente el costo de la mano de obra.

c. Tamaño adaptable al espacio disponible, pues no posee ningún tipo de restricción siempre que cumpla con las normativas vigentes.

d. Posee un diseño flexible en cuanto a personalizaciones en orden de satisfacer las necesidades del giro de negocio del cliente. También, permite añadir equipamiento que facilita la construcción a través de grúas o puentes. (Peña, 2009)

## **2. Tipos de naves industriales.**

a. Según la constitución de su estructura, poseen la siguiente clasificación:

- Naves de hormigón: estructura constituida a base de cemento, arenas y gravas o piedras, la misma se caracteriza por ser resistente a incendios y firme permitiendo la distribución de diferentes espacios para la ejecución de distintas operaciones. En caso de incendio, las estructuras prefabricadas de hormigón alcanzan desde R90 a R240 haciendo referencia al número de minutos transcurridos para alcanzar la capacidad portante, integridad y aislamiento de la edificación al entrar en contacto con el fuego.
- Naves de estructura metálica: estructura constituida de metal cuya rigidez es menor que la de hormigón por lo que es necesario arriostrar la estructura en orden de brindarle rigidez ante fuerzas de viento, pero permite la modificación continua tanto en su estructura principal como en el cerramiento. Sin embargo, es necesario proteger contra el fuego a través de pinturas intumescentes obteniendo resistencias menores de 50 minutos.
- Naves mixtas: dicha estructura, emplea proporciones tanto metal como hormigón para constituir la estructura. Sus componentes brindan mayor flexibilidad a la estructura.

b. En conformidad con el *Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RSCIE)*, se clasifican según su facilidad de propagación de incendios de la siguiente manera:

- Tipo A: hacen referencia a edificaciones que se encuentran ocupadas por otros establecimientos, por lo que presentan mayor riesgo de propagación.

- Tipo B: estas naves son ocupadas en su totalidad, sin embargo, poseen a una distancia inferior de tres metros un edificio colindante, causando que el fuego pueda extenderse con facilidad hacia la nave.
- Tipo C: al igual que las naves tipo B, son ocupadas en su totalidad. Por el otro lado, a diferencia del tipo B, están situadas a más de tres metros de las edificaciones colindantes. Es necesario que el espacio entre edificaciones esté libre de objetos o elementos que puedan extender la propagación de fuego.
- Tipo D: dichas naves se encuentran ubicadas en un espacio abierto que puede estar totalmente cubierto. Sin embargo, posee una pared lateral que debe estar completamente abierta.
- Tipo E: hace referencia a las naves industriales que se encuentran en espacios abiertos, pero a diferencia del tipo D, se encuentran cubiertas hasta un 50 %, puesto que algunas paredes laterales en la parte de la cubierta no se encuentran cerradas. Cabe mencionar, que es la nave con el menor riesgo de propagación de incendios.

c. Según su actividad y función, las naves industriales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Naves de almacenamiento y distribución: son estructuras empleadas para guardar y enviar las mercancías al momento que sean solicitadas por el cliente. Suelen construirse cerca de grandes vías de comunicación que posean fácil acceso a los aeropuertos.
- Naves de fabricación: son estructuras cuya distribución es variable dependiendo de la actividad desarrollada por la empresa. Cabe mencionar, que aproximadamente el 20 % del espacio se destina a oficina y el resto para la transformación de materia prima en productos.
- Naves flexibles: estas, a diferencia de las naves de fabricación, destinan mayor porcentaje al área de oficina. Sin embargo, también desarrollan actividades de transformación por lo que requieren sistemas especiales de cableado.

(Morales, 2023)

**3. Elementos de una nave industrial.** Tal y como se mencionó anteriormente, las naves industriales son una instalación en donde se realiza ya sea el almacenamiento de productos como la manufactura, ensamble y distribución de estos. Aún cuando su construcción no depende específicamente de alternativas únicas, los componentes de una construcción tradicional son los siguientes:

a. Zapatas: hacen referencia a los elementos estructurales catalogados como cimentaciones superficiales cuya función es tolerar la carga de toda la nave industrial. En cuanto a su apariencia, son cuerpos geométricos de concreto que reciben un solo sistema de carga. Son constituidos por cemento y proporciones de acero corrugado. En orden de dimensionar una zapata rectangular, es necesario distribuir las tensiones normales considerando que la fuerza cortante predomina la determinación del espesor de la zapata. Esto, tomando en cuenta que, a diferencia de una viga, las zapatas poseen claros cortos en donde las cargas del

suelo ascienden a varios miles de libras por pie. Cabe mencionar, que la geometría depende en gran parte del espacio disponible. Por ejemplo, las zapatas rectangulares se emplean comúnmente en el caso que las secciones transversales de la columna sean rectangulares. Otro aspecto por considerar es el espesor de la losa puesto que, al ser mayor de 4 pies, se recomienda emplear zapatas escalonadas. Lo anterior, representa una disminución en la cantidad de concreto empleada.

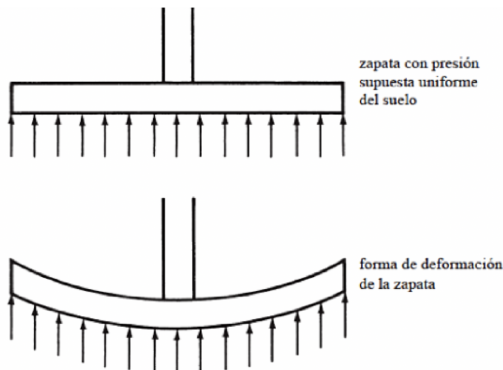


Figura 1. Imagen representativa de la deformación de una zapata  
Fuente: EIGO Construcciones, 2018

b. Armaduras: hacen referencia a la unión de perfiles de acero que constituyen entramados o armazones, los cuales dan como resultado el esqueleto de las naves industriales. Su función reside en mantener los muros y la cubierta. Dichas armaduras o cuchillos están constituidas principalmente de madera, hierro u hormigón armado. Cabe mencionar que, sobre ellas, se colocan las correas que son un apoyo para el entramado de listones. Por el otro lado, las correas también pueden soportar de forma directa el material del tejado. En la construcción de la armadura se pueden emplear joist, los cuales son definidos como un elemento estructural que posee un sistema de alma abierta el cual, al encontrarse simplemente apoyado, permite el soporte de cargas generadas en la cubierta o el entre piso. Su análisis estructural puede simplificarse a la evaluación estática de una viga convencional, aun cuando necesita un peralte mayor en comparación a las vigas de alma llena.

c. Columnas: son definidas como elementos estructurales cuya función es soportar la carga que transfieren desde el techo a través de losas y muros hasta la zapata y por ende, al terreno. Comúnmente, están constituidas de acero, hormigón o bien una combinación de las dos. Se caracterizan por poseer gran resistencia frente a cargas sísmicas y de viento.

d. Largueros: en la mayoría de los casos, son polines de acero que se emplean para el soporte del techo de las bodegas. Son fabricados a través de vigas para sobrellevar la lámina de acero. Cabe mencionar, que es necesario situar entre las riostras y largueros contravientos en orden de impedir que la armadura se desvíe de la posición vertical. Dichos polines de acero se pueden clasificar según su forma de fabricación. Entre ellas, sobresalen las siguientes:

- Perfiles laminados: hacen referencia a las barras rectas fabricadas directamente a una temperatura entre 950°C a 1150°C.

- Perfiles soldados: estos, se soldan a través de planchas terminadas para formar perfiles como T y doble T. Generalmente, se emplea un equipo soldador automático que disminuye las tensiones residuales o deformaciones de los perfiles en la etapa de fabricación.
- Perfiles doblados en frío: al igual que los perfiles soldados, emplean planchas terminadas que doblan en distintas curvaturas empleando prensas o trenes en frío, lo cual genera fluencia por parte del material.

(Morales, 2023)

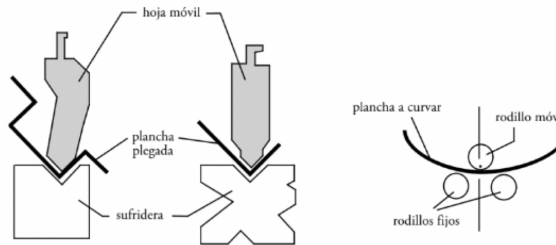


Figura 2. Imagen representativa de perfiles doblados en frío  
Fuente: ARracking, 2021

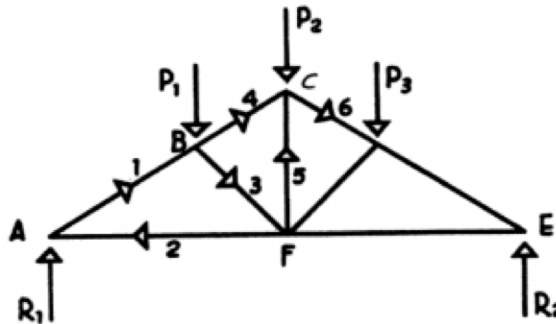


Figura 3. Imagen representativa de la fuerza en cada nodo de la armadura  
Fuente: Natali, 2020

e. Cubiertas: son denominadas estructuras ligeras que le brindan protección a los productos, maquinaria, mobiliario y operadores dentro de la edificación. El emplear panel sándwich intercalado con lámina translúcida permite el paso de la luz natural. En una cubierta, cuando las fuerzas se dirigen hacia el centro de la barra se genera compresión, mientras que al alejarse genera trabajo de tracción (Morales, 2023).

#### D. ¿Qué es una bodega autoportante?

La bodega autoportante es definida como una estructura cuyo sistema de almacenaje conocido como estanterías, además de recibir las unidades de carga, soportan la estructura de la edificación. También, son denominadas silos autoportantes, los cuales a fin de aumentar la productividad dentro del proceso incorpora medios automatizados o robotizados

en el flujo de mercancías. Adicional a soportar el cerramiento y la cubierta, también debe contener las fuerzas externas como el viento o la nieve (ARracking, 2021).

En orden de construir la cubierta de una nave autoportante, se emplea frecuentemente paneles de acero atornillados o soldados al armazón, que simultáneamente se encuentra fijados a las estanterías. Dicho armazón, puede ser diseñado a una o dos aguas, como también un diseño plano. Por el otro lado, para la cobertura lateral de las bodegas se suele emplear paneles que se sujetan ya sea de manera directa a la estructura de los *racks*, por medio de un armazón intermedio que se encuentre adherido a la estructura o bien, un armazón completamente independiente. Incluso, se ha recurrido a emplear hormigón como base del muro, el cual se emplea como cerramiento hasta una altura determinada (Mecalux, 2020).

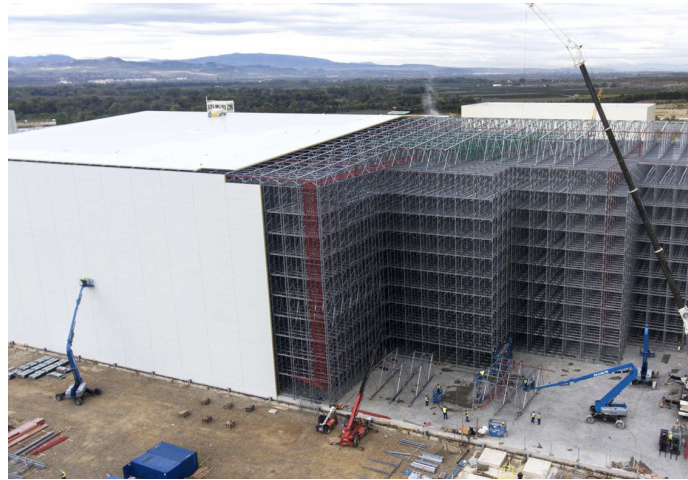


Figura 4. Imagen representativa de la cubierta de una nave industrial.  
Fuente: ARracking, 2021

## E. Principales elementos de la bodega autoportante

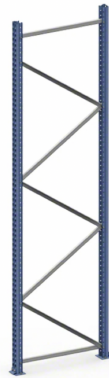
El armazón de una bodega autoportante está compuesta por los siguientes elementos:

1. **Puntales:** son definidos como los elementos que conforman la estructura vertical de los bastidores de la estantería. Estos poseen un pie que se emplea para fijar la estructura al suelo de la bodega (Arilla, 2022).

2. **Diagonales:** hace referencia a los perfiles metálicos colocados en diagonal que se emplean como unión entre bastidores para reforzar la capacidad de carga de la estructura vertical, brindando mayor estabilidad a la estantería. Esto, al permitir la resistencia ante las fuerzas transversales que recaen sobre los marcos (Mecalux, 2020).

3. **Bastidores:** se definen como una estructura conformada por dos puntales y sus respectivas diagonales, además de los accesorios necesarios para fijar los mismos como las placas o pie base junto con su respaldo. Se emplean como soporte vertical que se conectan a un marco portante. Específicamente, en el caso de las estanterías para cargas ligeras, los bastidores se montan con perfiles angulares y de esquina con el objetivo de constituir un marco portante en el cual se puedan apoyar las estanterías. En cuanto al análisis sísmico, es importante contar con la altura y ancho del marco, al igual que con el calibre de acero del

que se fabricaron las columnas. Otro aspecto que considerar es el número de orificios de la estructura, el tamaño de la plataforma y el material de refuerzo junto con sus respectivas dimensiones (Arilla, [2022](#)).



*Figura 5.* Imagen representativa de los bastidores de una bodega autoportante.  
Fuente: Mecalux, [2021](#)

**4. Largueros:** hacen referencia a los perfiles metálicos horizontales que son fijados de forma directa en los puntales uniendo los bastidores contiguos. Los mismos, puede unirse al puntal al ser soldados o atornillados, lo cual forma una unión extremadamente firme. Estos, son empleados para apoyar los paneles en donde se coloca la mercancía. Dependiendo del peso de esta, se suelen colocar topes de palé para evitar derrames accidentales. Según su función, los largueros pueden clasificarse en:

- Paletas: emplean un marco de dos o más largueros, dependiendo del número de horquillas de la paleta, se determina la cantidad de entradas para extraer la mercancía que tendrá el montacargas. Por ejemplo, al contar con dos horquillas se permite la entrada del vehículo por dos vías.
- Picking: los largueros de picking cuentan con niveles formados por dos largueros con paneles o estantes que se encuentran apoyados en ellos. Al enganchar el panel al ala vertical fortalece la rigidez de la estructura.

(Mecalux, [2020](#))

a. Según su acabado, los largueros se clasifican de la siguiente forma:

- Pintado: es el acabado más común, el proceso de pintado se realiza de forma automatizada al aplicar un producto constituido por cerámica sintética y agua osmotizada. Posteriormente, se compacta en horno. El pintar el larguero permite la disminución de impurezas causantes de corrosión.
- Pre-galvanizado: se emplea con piezas que poseen previamente una forma específica. Su proceso implica la laminación de la chapa metálica, posteriormente se recubren de zinc líquido caliente. A comparación del galvanizado en caliente, la chapa de acero se galvaniza de forma uniforme y rápida.

- **Galvanizado en caliente:** estas piezas protegen más frente a la corrosión en comparación del acabado pintado. Esto considerando que la pieza ha sido completamente sometida a un baño de zinc, lo cual lo hace idóneo para ambientes exteriores que se encuentren ubicados en presencia de sustancias agresivas.

(Mecalux, 2020)



Figura 6. Imagen representativa del larguero de una bodega autoportante  
Fuente: Mecalux, 2021

**5. Estantes:** los estantes se emplean para colocar las unidades de carga. Estos se ubican sobre los largueros apoyados en las vigas, y comúnmente se fabrican de metales galvanizados, madera aglomerada o plástico, según el volumen de carga a colocar. En cuanto a las variaciones de estanterías, se puede mencionar sin tornillos. Según su material, se clasifican en estanterías de madera, de rejilla o bien, metal galvanizado.

**6. Travesaños:** son perfiles metálicos que se ubican de forma perpendicular al larguero en orden de brindarle mayor resistencia al sistema de almacenamiento. Evita caídas de estibas.

**7. Atirantados:** hacen referencia a los perfiles metálicos ubicados en la estructura de la estantería para brindarle rigidez al sistema de almacenamiento.

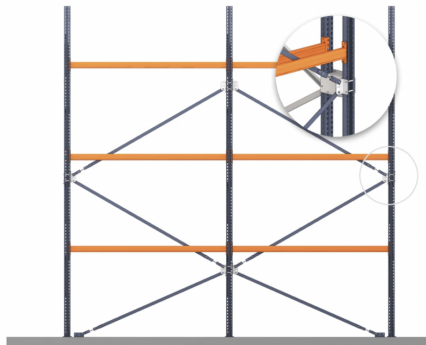


Figura 7. Imagen representativa del atirantado de una estantería  
Fuente: Mecalux, 2021

**8. Distanciador:** perfil metálico que se coloca entre dos puntales de distintos bastidores para unir módulos de estanterías a gran altura y mantener la distancia constante entre bastidores. Fortalece la estructura.

(Arilla, 2022)

## F. Unidad de carga

Se decidió que la bodega almacenaría cajas de lápices marca Mongol con volumen de  $0.001 \text{ m}^3$ , las cuales poseen las siguientes dimensiones:

- L: 0.2m
- A: 0.1m
- H: 0.05m

Para efectos del trabajo de graduación, se supuso que la empresa está interesada en suministrar a los clientes 500 cajas de lápices almacenadas en cada tarima. La misma, posee las siguientes dimensiones:

- L: 1.22m
- A: 0.85m
- H: 0.15m

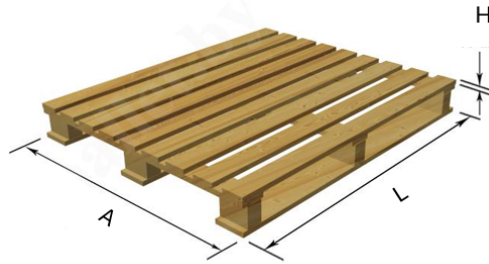


Figura 8. Tarima

Fuente: Elaboración propia

## G. Diferencias entre naves industriales convencionales y bodegas autoportantes

Tal y como se mencionó anteriormente, es circunstancial evaluar la factibilidad de la bodega convencional o bien, un silo autoportante en base a las demandas comerciales de la empresa. Es por ello, que a continuación se profundizan las principales características en las que difieren las naves industriales convencionales de las bodegas autoportantes:

**1. Área de construcción:** a diferencia de las naves industriales convencionales, las bodegas autoportantes pueden alcanzar los 40 metros de altura, lo que las convierte en la alternativa perfecta en proyectos donde el terreno es escaso. Esto, considerando que al construir hacia arriba se emplea menor área por lote, lo que se traduce en la disminución significativa del costo de adquisición del terreno. Disminuyendo hasta el 40 % de la inversión total.

**2. Capacidad de almacenaje:** a comparación de las naves industriales convencionales, los silos autoportantes al eliminar elementos estructurales como vigas y columnas maximizan la capacidad útil dedicada al almacenaje. Sin mencionar, que comúnmente las bodegas autoportantes poseen sistemas de manejo de inventarios automáticos que reducen el tamaño de pasillos, aumentando el número de posiciones para almacenaje.

**3. Fuerzas sísmicas:** en las naves autoportantes, las fuerzas sísmicas son distribuidas en los bastidores que son empleados como marcos, mientras que en las estructuras de acero convencionales un solo marco soporta las inclemencias del tiempo. Por esta razón, la bodega autoportante es menos vulnerable a sufrir daños por fuerzas externas.

**4. Tiempo de ejecución:** las estanterías componen el esqueleto principal de las bodegas autoportantes y que el cerramiento y cubierta se pueden anexar posterior a la instalación de los bastidores, por lo que se reducen de manera drástica los tiempos de construcción. Según INGGAR (2021), el tiempo de construcción de una bodega autoportante se puede reducir hasta 5 meses.

**5. Mantenimiento:** pueden ser totalmente desarmados y desplazados a otra locación y pueden ser mantenidos más fácilmente que una estructura convencional. Es importante enfatizar que estas estructuras necesitan de mantenimiento preventivo periódico, para evitar la oxidación ocasionada por las condiciones de humedad. (Arilla, 2021)

## H. Propiedades físico-mecánicas del acero

El acero es una aleación de hierro y carbono con pequeñas proporciones de carbón, cromo, manganeso, níquel, aluminio y silicio. Cabe mencionar, que la proporción de los otros elementos que integran el acero modifican sus propiedades de templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, capacidad de trabajo, soldabilidad y maquinabilidad. Dicha composición varía ampliamente siendo alrededor de 3500 aleaciones de acero, generando los siguientes tipos de acero que se emplean según el uso que se les desea dar:

| Producto                                     | Acero               | Producto                            | Acero               |
|--|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Forjas, tubos y acoplamientos para aeronaves | 4140, 8740          | Engranajes diferenciales            | 4023                |
| Carrocerías automotrices                     | 1010                | Engranajes (automóviles y camiones) | 4027,4032           |
| Ejes   | 1040, 4140          | Tren de aterrizaje                  | 4140,4340,8740      |
| Cojinetes de bolas y pistas                  | 52100               | Arandelas de seguridad              | 1060                |
| Pernos                                       | 1035,4042,4815      | Tuercas                             | 3130                |
| Árboles de leva                              | 1020,1040           | Rieles y ruedas de ferrocarril      | 1080                |
| Cadenas (transmisión)                        | 3135,3140           | Resortes (espiral)                  | 1095,4063,6150      |
| Resortes en espiral                          | 4063                | Muelle (hoja)                       | 1085,4063,9260,6150 |
| Bielas                                       | 1040,3141,4340      | Tubería                             | 1040                |
| Cigüeñas (forjados)                          | 1045,1145,3135,3140 | Alambre                             | 1045,1055           |
|  |                     | Alambre (música)                    | 1085                |

Cuadro 1

*Selección típica de aceros al carbono y de aleación para varias aplicaciones*

Fuente: McCormac y Csernak, 2013

En cuanto a la resistencia, ductilidad y dureza del acero, dependen estrechamente del tipo de aleación y composición del mismo. Sin embargo, se puede mencionar lo siguiente:

**1. Plasticidad:** hace referencia a la capacidad que tiene el acero para deformarse a causa de una acción de carga, y luego al retirar la misma, logra mantener la deformación. El acero cuya constitución posee porcentajes pequeños de carbón tiene mayor capacidad de conservar su forma después de haber sido sometido a un esfuerzo.

**2. Fragilidad:** hace referencia a la propiedad mecánica de deformar el metal previo a la rotura, siendo lo contrario a la tenacidad. El acero cuya constitución posee porcentajes pequeños de carbón tiene mayor facilidad de romperse al ser sometido a un esfuerzo.

**3. Maleabilidad:** hace referencia a la propiedad del acero para ser laminado. La mayoría de las aleaciones de acero inoxidable se caracterizan por ser maleables. Cabe mencionar, que la temperatura y el modo de ensayo juegan un papel fundamental en la maleabilidad por el equipo empleado.

**4. Dureza:** las aleaciones de acero con proporciones elevadas de carbón presentan mayor resistencia ante agentes abrasivos.

**5. Tenacidad:** hace referencia a la fuerza con la que el acero resiste a romperse a causa de sollicitaciones significativas. Estas sollicitaciones significativas son el peso mínimo previo a reducirse en hilos del mismo diámetro. El acero con concentración mediana de carbón posee mayor resistencia ante la aplicación de una fuerza externa.

Por el otro lado, la constitución de la aleación de acero no influye directamente sobre la densidad, conductividad eléctrica y térmica. Entre los aspectos a destacar, está su capacidad de reflejar la luz o emitir brillo, la cual aumenta conforme incrementa el porcentaje de aluminio. Otro aspecto a mencionar es que el porcentaje de hierro en la aleación de acero juega un papel crucial en su capacidad para ser inducido a un campo magnético.

(McCormac & Csernak, 2013)

**6. Esfuerzos residuales.** El acero, al encontrarse sujeto a una deformación no homogénea tiende a desarrollar esfuerzos residuales, luego de que las fibras exteriores de la pieza de acero alcanzan la cedencia. Cabe mencionar que el acero típico, alcanza la siguiente distribución de esfuerzos según el tipo de deformación:

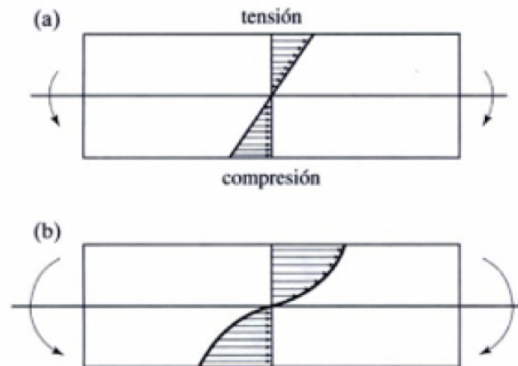


Figura 9. Imagen representativa de esfuerzos a tensión y compresión  
Fuente: McCormac y Csernak, 2013

Tal y como se puede ver, la distribución de esfuerzos incrementa de manera lineal elástica conforme aumenta el momento externo. Por lo que al intensificar el nivel de esfuerzo se puede observar en la gráfica cómo el material alcanza el nivel de cedencia hasta llegar a un punto de deformación permanente.

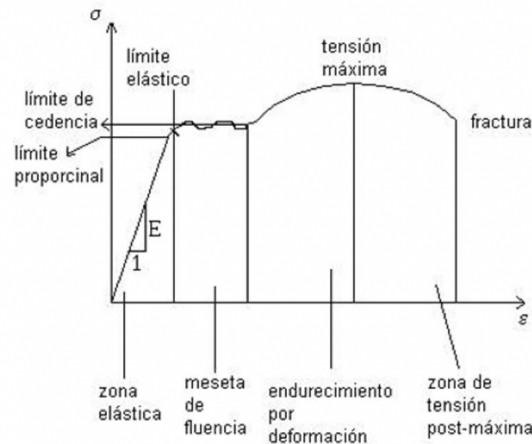


Figura 10. Imagen representativa de diagrama de esfuerzos  
Fuente: McCormac y Csernak, [2013](#)

Además del incremento de una fuerza no proporcional, los esfuerzos residuales se originan también por gradientes de temperatura durante el proceso como en el caso de fundiciones y forjado. En el caso de los esfuerzos residuales a tensión, generan contracciones y expansiones que deforman de manera heterogénea la viga. Lo anterior, provoca grietas por esfuerzo y corrosión de las piezas. Por el otro lado, se busca que el producto alcance esfuerzos residuales a compresión, en orden de incrementar la vida a la fatiga de los componentes.

## I. Conexiones de acero

Las conexiones de acero se definen como la intersección a través de dos o más elementos que unen un nodo con el objetivo de absorber las cargas a las cuales son sometidas. Su importancia de reconocer la clasificación de los distintos tipos de conexiones de acero recae en evitar las fallas estructurales por un sistema de conexiones deficiente (McCormac, [2013](#)).

### 1. Tipos de conexiones de acero LFRD.

a. Simple: son conexiones comunes en las estructuras de acero que permite la rotación en el nodo al no transferir momentos flectores. La misma, no posee restricciones con relación al giro y debe ser capaz de poder acomodar las rotaciones de los extremos de la viga, las cuales son contempladas como simplemente apoyados. Cabe mencionar, que en orden de que la conexión sea considerada como simple, se debe desarrollar el 20 % de capacidad contra la rotación del nodo.

b. Rígida: son conexiones en las estructuras que no permiten la rotación cero en el nodo, puesto que la misma se contrarresta con fuerzas que impiden el giro; manteniendo el ángulo entre el elemento soportado y soportante durante la deformación. A diferencia de la conexión simple, para ser considerada conexión rígida deberá resistir el 90 % de capacidad contra la rotación del nodo. Dicho tipo de conexión permite que los marcos de la estructura presenten mayor resistencia a la flexión ante los desplazamientos laterales causados por fuerzas de viento o sismo. Cabe mencionar, que al emplear una conexión rígida es circunstancial que el suelo sea poco comprensible para evitar que la columna gire.

c. Semirígida: son conexiones en las estructuras que resisten entre el 20 % y 90 % de capacidad contra la rotación del nodo. Estas conexiones, permiten una mayor rotación que una conexión rígida puesto que son capaces de transmitir de manera significativa el momento cortante, a flexión y la fuerza axial. Además, describen un comportamiento no lineal en relación con el empotramiento perfecto y la articulación ideal manteniéndose entre cero rigidez y rigidez infinita. (King & Chen, 1993)

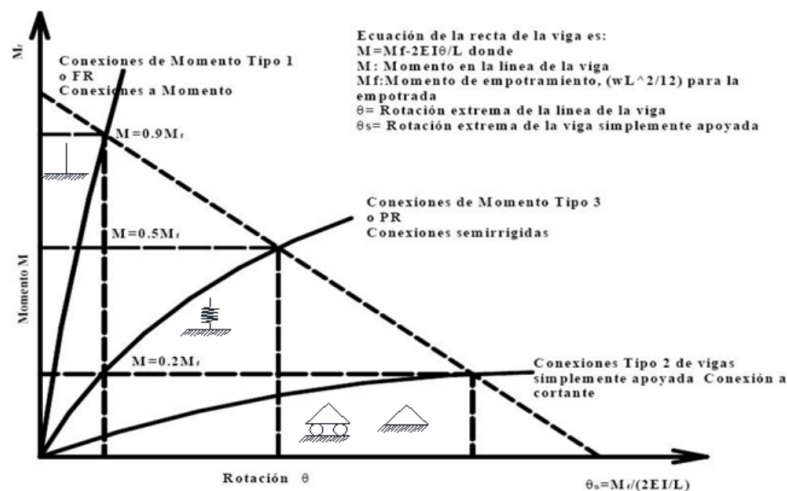


Figura 11. Imagen representativa de la relación entre el momento y la rotación.  
 Fuente: King y Chen, 1993

## J. Software especializado de cálculo estructural

La utilización de programas informáticos facilitan el dimensionamiento y detallamiento estructural, puesto que permiten la revisión de resistencias a las que estará sujeta la estructura durante su vida útil. Lo anterior, contribuye a la elaboración de presupuestos más precisos y óptimos. Actualmente, los cinco softwares más utilizados para el cálculo de estructuras son: CypeCAD, SAP2000, Midas, Autodesk Robot y Tekla Structures. Para efectos del presente trabajo, se empleará el siguiente software:

1. **ETABS.** El programa computacional ETABS 2020 posee una interfaz gráfica 3D que se encuentra orientado a objetos, la cual permite el modelado de estructuras para su dimensionamiento según las necesidades del proyecto. Dicho dimensionamiento, se realiza a través de la comprobación de resistencia de los elementos estructurales ante las cargas generadas de viento, sismo o por el peso propio de la estructura, según normativas cana-

dienses, americanas, turcas, entre otras. También, el programa analiza los desplazamientos en cada etapa de la estructura, al igual que el pandeo o colapso progresivo.

Cabe destacar, que el dimensionamiento a través de ETABS es optimizado, puesto que el programa computacional permite visualizar los resultados de forma interactiva por cada elemento, sin mencionar que está diseñado para exportar e importar fácilmente tablas de Microsoft Excel y Access para su edición simultánea. Lo anterior, facilita el ajuste de las propiedades de las secciones a fin de obtener un dimensionamiento más preciso y eficiente (CSI Portugal, 2020).

## K. Códigos de diseño

Al diseñar una estructura, es circunstancial garantizar que la misma sea segura y funcional. Para ello, se emplean códigos de construcción que contemplan los lineamientos, conceptos de estructuración y prácticas de diseño que permiten crear una edificación estable. En este proyecto, se contemplarán las siguientes:

**1. AGIES NSE 2-18:** *La Norma de Seguridad Estructural 2-10* es definida como una norma de seguridad estructural para edificaciones en Guatemala a través de la cual se establecen solicitaciones de carga mínimas de diseño influenciados por la actividad volcánica, empujes de diversa naturaleza, cargas gravitacionales y la propia inestabilidad del terreno (AGIES NSE 2-18, 2018).

a. Cargas muertas: hacen referencia a todos aquellos elementos que se encuentran posicionados de manera permanente en la construcción. Cabe mencionar, que incluye elementos cuyo peso no varía de forma significativa con el tiempo.

1) Integración de cargas: en orden de realizar la integración de cargas de los elementos permanentes de la construcción, se deben emplear valores representativos del peso de los materiales. Por lo que el Código NSE2-18 detalla lo siguiente acerca de demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección:

- Pisos: se debe contemplar el peso propio de los rellenos de nivelación según el terreno de la estructura, además del peso propio del piso. Si en dado caso, el coeficiente de planicidad es, según el código de Construcción de Pisos y Losas de Concreto del Comité ACI 302, menor a 30 se pueden considerar rellenos de nivelación menores a  $100 \text{ kg/m}^2$ .
- Tabiques y particiones: estos, deben contemplarse como cargas uniformemente distribuidas en el entrepiso de no haber sido incluidos en el sistema estructural en conformidad con lo establecido en el código NSE2-18.
- Fachada y cerramientos perimetrales: se deben contemplar las paredes exteriores y barandales como cargas uniformemente distribuidas sobre el perímetro del entrepiso.
- Equipos fijos: se considera equipo fijo aquella maquinaria que por su tamaño y forma de instalación permanecen de manera estacionaria en un solo lugar.

b. Cargas vivas: son definidas como cargas gravitacionales probables ocasionadas por el uso y la ocupación del edificio de forma temporal o variable a causa de su cambio de ubicación. Entre dichas cargas, se puede mencionar muebles, equipo móvil, vehículos y ocupantes de la estructura. En caso de tratarse de una carga viva concentrada cuya área de aplicación es desconocida como la del equipo, el código recomienda aplicarla en la posición que genere efectos más desfavorables.

Según el tipo de ocupación o uso, la norma NSE2-18, a través de la Tabla 3-1 brinda el peso empleado de forma frecuente al realizar el análisis estructural.

| Tipo de ocupación o uso | Wv (kg/m <sup>2</sup> ) | Pv (kg) |
|-------------------------|-------------------------|---------|
| Almacenes               |                         |         |
| Minoristas              | 500                     | 800     |
| Mayoristas              | 600                     | 1,200   |
| Bodegas                 |                         |         |
| Cargas livianas         | 600                     | 800     |
| Cargas pesadas          | 1,200                   | 1,200   |
| Fábricas                |                         |         |
| Industrias livianas     | 500                     | 800     |
| Industrias pesadas      | 1,000                   | 1,200   |
| Cargas livianas         | 600                     | 800     |
| Cargas pesadas          | 1,200                   | 1,200   |

Cuadro 2

Tabla 3-1 NSE 2-18

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

c. Cargas de viento: adicional a la carga de los elementos permanentes en la estructura y las cargas gravitacionales probables ocasionadas por el uso, se debe contemplar los empujes y succiones que son provocados por la acción del viento. Para ello, se considera la dirección del viento menos favorable para la estabilidad de la estructura. Según el sitio de la bodega, le corresponderá la exposición según el cuadrante ya sea a 90° a barvolento o bien 45° a cada lado del eje del análisis. A continuación, se mencionan los tipos de exposición al viento:

- Exposición B: el 80 % del cuadrante a barvolento será urbano con edificaciones de un nivel o bien que se encuentren cercanos a un bosque que ocupe más de 1500 metros desde el proyecto.
- Exposición C: cuenta con un terreno que posee un cuadrante con el 80 % de explanadas llanas y abiertas a una distancia mínima de 750 metros desde el proyecto. Cabe mencionar, que se clasifican como exposición C todos aquellos terrenos que no puedan ser clasificados tanto en D como en B.
- Exposición D: hace referencia a aquel terreno que se encuentra frente a un cuerpo de agua, cuya extensión ocupa más de 1500 metros de la costa. Si el sitio se localiza a menos de 500 metros desde la costa o bien a 10 veces la altura de la estructura, posee una exposición D.

- 1) Mapa de zonificación por viento: la NSE2-18 proporciona un Mapa de Zonificación por Viento de la República que ilustra la velocidad básica del viento sobre el suelo según la distribución geográfica en macrozonas de Guatemala señaladas en la Figura No.12. El código menciona que en la práctica, no se debe de emplear una velocidad básica menor del viento que la indicada en el Anexo A del mismo.

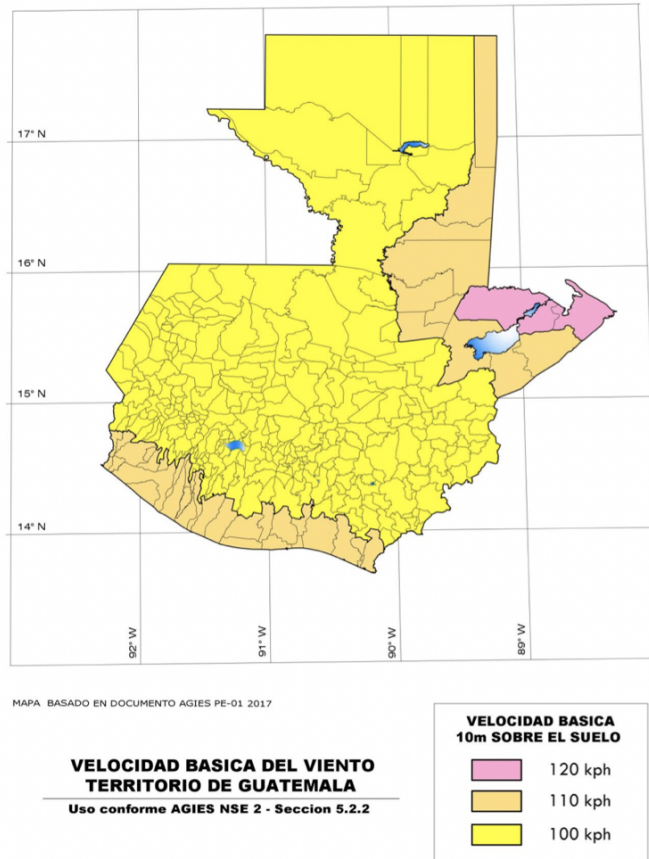


Figura 12. Mapa de zonificación por viento NSE2-18  
Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

- 2) Presión de viento: el código establece la siguiente ecuación para calcular la presión de viento de una estructura principal o bien, para componentes de las mismas:

**Ecuación No.1.** Presión del viento

$$P_z = C_{ez} * C_q * q_s * I_c$$

En donde:

$P_v$ : presión de diseño por viento ( $\frac{kg}{m^2}$ )

$C_{ez}$ : coeficiente de exposición y altura (Tabla 5.3.3-1)

$C_q$ : coeficiente de presión (Tabla 5.3.6-1)

$q_s$ : presión de remanso del viento en  $\frac{kg}{m^2}$  (Tabla 5.3.2-1)

$I_c$ : factor de importancia según categoría

- 3) Presión de remanso: la misma, es directamente proporcional a la velocidad básica del viento y se relaciona de la siguiente manera:

**Ecuación No.2.** Presión de remanso

$$q_s = 0.0048v_s^2$$

En donde:

$q_s$ : presión básica del viento ( $\frac{kg}{m^2}$ )

$v$ : velocidad básica del viento ( $\frac{km}{h}$ )

- 4) Corte basal: el código comenta que, si los cortantes mayorados de viento son menores que los cortantes sísmicos, se podrá obviar el diseño por viento. Sin embargo, se debe verificar la estabilidad contra volteo sin contemplar las cargas vivas que pueden disminuir dicha acción. En el caso de las obras ordinarias, la relación entre el momento estabilizador generado por el peso de la bodega y el momento actuante de volteo por viento no debe ser menor que 1.5.
- 5) Otras cargas: al ser Guatemala, un país que cuenta con más de 340 conos volcánicos, es necesario que las estructuras sean diseñadas para resistir las cargas de tefra. Para aquellas estructuras que se encuentren en un radio de 10 km del foco eruptivo de los volcanes Pacaya, Fuego y Santiaguito, se les debe aplicar la siguiente carga distribuida sobre el techo y superficies expuestas:

| Categoría de Obra | Aplicada a estructura <sup>[1]</sup> | Impuesta a lámina (cuando aplique) <sup>[2]</sup> |
|-------------------|--------------------------------------|---|
| Categorías II     | 85 kg/m <sup>2</sup> <sup>[3]</sup>  | 55 kg/m <sup>2</sup> <sup>[4]</sup>               |
| Categoría III     | 125 kg/m <sup>2</sup>                | 85 kg/m <sup>2</sup>                              |
| Categoría IV      | 150 kg/m <sup>2</sup>                | 150 kg/m <sup>2</sup>                             |

Cuadro 3

Tabla 3-1 NSE 2-18

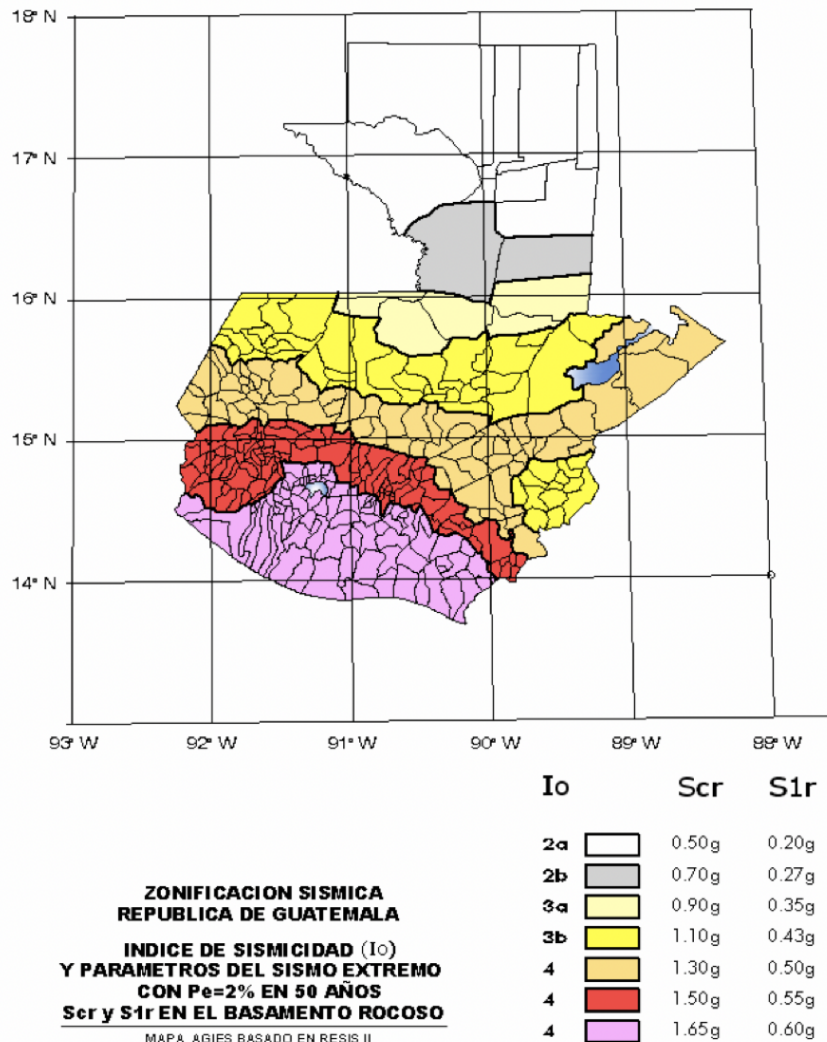
Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

d. Aspectos sísmicos: en orden de asegurar que la estructura cuente con el nivel de protección sísmica solicitado por la normativa regional, es necesario contemplar lo siguiente:

- 1) Generalidades: el índice de sismicidad hace referencia a la medida relativa de intensidad que se espera de un sismo según la región a lo largo del tiempo. El mismo, es esencial para contemplar el nivel de protección sísmica que requiere la estructura.

La NSE2-18 proporciona un Mapa de Zonificación Sísmica de la República que ilustra el índice de sismicidad según la distribución geográfica en macrozonas de Guatemala señaladas en la Figura No.13. En el caso del nivel de protección sísmica, que hace referencia al grado de protección que se le debe suministrar a una estructura, por construir o existente. Dicha figura, facilitada por la normativa, presenta cinco niveles de protección: A,B,C,D y E, siendo E el más alto.

**Figura 4-1**  
**Zonificación sísmica para la República de Guatemala**



*Figura 13.* Zonificación sísmica para la república de Guatemala  
 Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

2) La norma guatemalteca NSE2-2018 designa una categoría organizacional a toda obra nueva o existente basada en el impacto social que se provocaría si la misma fallara por un sismo. Dichas categorías son:

- Categoría I Obra utilitaria: hace referencia a las obras que se emplean como refugio en caso existiese un desastre natural. Entre ellas, destacan las instalaciones agrícolas o industriales de ocupación incidental.
- Categoría II Obra ordinarias: se definen como las obras que no pertenecen a la clasificación de las categorías I, III o IV y que además, poseen una carga de ocupación inferior a 300 personas como oficinas o salas de ventas.
- Categoría III Obras importantes: aun cuando son estructuras que albergan una gran cantidad de personas, se diferencian de las obras utilitarias en que los ser-

vicios prestados no son esenciales luego de un desastre natural. Asimismo, la mayoría poseen valores culturales reconocidos. Algunos ejemplos de obras importantes son: museos, guarderías y prisiones.

- Categoría IV Obras esenciales: hace referencia a aquellas obras que deben mantenerse en operación continua antes, durante y después de un sismo. Entre ellas, destacan los hospitales con servicio de emergencia, centrales telefónicas y aeropuertos.

| Índice de Sismicidad                       | Clase de obra |               |                |            |
|--|---------------|---------------|----------------|------------|
|  | Esencial      | Importante    | Ordinaria      | Utilitaria |
| lo = 5                                     | E             | E             | D              | C          |
| lo = 4                                     | E             | D             | D              | C          |
| lo = 3                                     | D             | C             | C              | B          |
| lo = 2                                     | C             | B             | B              | A          |
| Probabilidad de exceder un sismo de diseño | 5% en 50 años | 5% en 50 años | 10% en 50 años | No aplica  |

Cuadro 4

Tabla 4.2.2-1 NSE 2-18

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

- 3) Según la superficie del terreno, se deben de ajustar los parámetros  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$  según lo indican las siguientes fórmulas:

**Ecuación No.3.** Ordenada espectral de sismo extremo

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a$$

En donde:

$S_{cs}$ : ordenada espectral de sismo extremo

$S_{cr}$ : ordenada espectral de período corto

$F_a$ : coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos

**Ecuación No.4.** Ordenada espectral de sismo con duración de 1 segundo

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v$$

En donde:

$S_{1s}$ : ordenada espectral de sismo con duración de 1 segundo

$S_{1r}$ : ordenada espectral de período de 1 segundo

$F_v$ : coeficiente de sitio para periodos de vibración largos

En ocasiones, es necesario ajustar el valor de  $S_{cr}$  y  $S_{1r}$  para contemplar incrementos en las vibraciones del suelo. El código, recomienda realizarlo de la manera siguiente:

**Ecuación No.5.** Ordenada espectral de sismo extremo

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a$$

En donde:

$S_{cs}$ : ordenada espectral de sismo extremo

$S_{cr}$ : ordenada espectral de período corto

$F_a$ : coeficiente de sitio para periodos de vibración cortos

$N_a$ : factor por proximidad de amenazas especiales

**Ecuación No.6.** Ordenada espectral de sismo con duración de 1 segundo

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v$$

En donde:

$S_{1s}$ : ordenada espectral de sismo con duración de 1 segundo

$S_{1r}$ : ordenada espectral de período de 1 segundo

$F_v$ : coeficiente de sitio para periodos de vibración largos

$N_v$ : factor por proximidad de amenazas especiales

- 4) Espectro sísmico: el espectro sísmico hace referencia al reflejo de las aceleraciones potenciales de un sitio ante la presencia de un sismo. Dichas curvas envolventes, concretiza las oscilaciones máximas que puede tener una estructura durante un período concreto, por lo que permite identificar si el diseño establecido cumple con las solicitaciones por norma.

Para construir los espectros de diseño, el código NSE2-2018 solicita lo siguiente:

- Períodos de vibración de transición: en orden de separar los períodos largos de los cortos, el código recomienda realizar lo siguiente:

**Ecuación No.7.** Período de vibración de transición

$$T_s = \frac{S_{1s}}{S_{cs}}$$

En donde:

$S_{cs}$ : ordenada espectral de sismo extremo

$S_{1s}$ : ordenada espectral de sismo con duración de 1 segundo

$T_s$ : período de vibración de transición

- Período de inicio: para definir el inicio de la meseta en el caso de períodos cortos del espectro, se debe considerar lo siguiente:

**Ecuación No.8.** Período de inicio

$$T_0 = 0.2T_s$$

En donde:

$T_0$ : inicio de la meseta para períodos cortos

$T_s$ : período de vibración de transición

En orden de obtener los puntos críticos para graficar un espectro sísmico preciso, la norma solicita contemplar las siguientes expresiones en orden de obtener un espectro genérico para cualquier período de vibración:

$$S_a(T) = S_{cd} \left[ 0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right] \text{ cuando } T < T_0$$

$$S_a(T) = S_{cd} \text{ cuando } T_0 < T < T_S$$

$$S_a(T) = S_{cd} \text{ cuando } T_S < T < T_L$$

$$S_a(T) = \frac{S_{1d}}{T^2} * T_L \text{ cuando } T \geq T_L$$

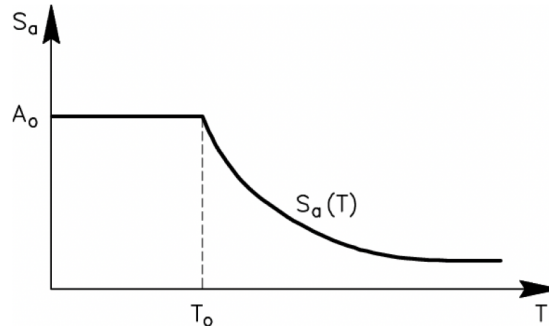


Figura 14. Espectro sísmico

Fuente: King y Chen, 1993

- Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño: el factor  $K_d$  permite determinar la probabilidad de que suceda el sismo de diseño contemplando el nivel de protección sísmica. La norma, contempla los siguientes valores a través de la Tabla No.4:

| Nivel de sismo  | Factor $K_d$ |
|---|--------------|
| Sismo ordinario — 10% probabilidad de ser excedido en 50 años | 0.66         |
| Sismo severo — 5% probabilidad de ser excedido en 50 años     | 0.80         |
| Sismo extremo — 2% probabilidad de ser excedido en 50 años    | 1.00         |
| Sismo mínimo — condición de excepción                         | 0.55         |

Cuadro 5

Tabla 3-1 NSE 2-18

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

En conformidad con la NSE2, a través de la siguiente expresión, se calibran los parámetros de diseño:

**Ecuación No.9.** Ordenada espectral sismo de diseño

$$S_{cd} = K_d * S_{cs}$$

En donde:

$S_{cs}$ : ordenada espectral de sismo extremo

$K_d$ : factor de determinación de los niveles de diseño

$S_{cd}$ : ordenada espectral del sismo de diseño

- 5) Combinaciones de carga: *la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala 7.5*, establece combinaciones de carga asociadas con el método de diseño por factores de cargas y resistencia en orden de determinar la capacidad resistente mínima que posee los elementos de la estructura. Entre ellas, destacan:

1. Carga de gravedad:

$$\begin{aligned} CR1 &= 1.4M \\ CR2 &= 1.2M + 1.6V + 0.5(V_t \text{ ó } A_R) \\ CR3 &= 1.2M + V + 1.6(V_t \text{ ó } A_R) \end{aligned}$$

2. Carga de sismo:

$$\begin{aligned} CR4 &= (1.2 + (0.2)(1.2))M + V + S_{vd} + S_{hd} \\ CR5 &= (1.2 - (0.2)(1.2))M - S_{vd} \pm S_{hd} \end{aligned}$$

3. Carga de viento

$$\begin{aligned} CR6 &= 1.2M + V \pm 1.3W + 0.5P_L \\ CR7 &= 0.9M \pm 1.3W \end{aligned}$$

En donde:

$M$ : carga muerta

$V$ : carga viva

$V_t$ : cargas vivas de techo

$A_r$ : cargas de tefra volcánica

$S_{vd}$ : carga sísmica vertical de diseño

$S_{hd}$ : carga sísmica horizontal de diseño

$W$ : cargas de viento

$P_L$ : carga de lluvia

**2. ANSI MH16.3-2016 (RMI).** El Rack Manufacturers Institute (RMI) desarrolló junto con el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares el conjunto de lineamientos, prácticas y requisitos para el diseño de bastidores de almacenamiento en orden de resistir la carga unitaria impuesta (*ANSI MH16.3-2016*, 2016).

a. Generalidades: el campo de aplicación de dicha normativa contempla los sistemas de almacenamiento en voladizo independientes, como también las estanterías cuya parte superior se encuentra endosada y constituida por acero en frío o bien, laminado en caliente. Además, aplica para sistemas integrados con estantes con plataforma, techos de cobertizo o bien marquesinas. Dicha estructura, requiere el uso de acero de calidad estructural en conformidad con los lineamientos de la AISI S100, adicional a las especificaciones solicitadas por la American Society of Testing and Materials (ASTM). La anterior, incluye

lineamientos a cumplir en cuanto a pernos, tuercas y arandelas, los cuales están expuestos a fragilización al trabajar bajo tensión. Es preponderante tomar en cuenta que la norma solicita, para el funcionamiento adecuado del sistema de almacenamiento, lo siguiente:

- Restringir la sobrecarga de cualquier brazo o columna. La unidad de carga debe ser colocada de forma simétrica en los brazos.
- Inspeccionar que el producto en los brazos y bases esté correctamente colocado para el correcto funcionamiento operacional.
- Prohibir el doble apilamiento de tarimas o bien, contemplarlo dentro del diseño.
- Asegurarse de colocar el producto cercano a las columnas para brindar mayor estabilidad, evitando cargar las puntas de los brazos.

Cabe mencionar, que todas las columnas de la estructura deben estar ancladas al piso por medio de mínimo dos anclajes en las placas base para asegurar que sean capaces de transferir las cargas a las losas de piso.

b. Combinaciones para el método LRFD: el reglamento establece combinaciones de carga asociadas con el método de diseño por factores de cargas y resistencia en orden de determinar la capacidad resistente mínima que posee los elementos de la estructura. Entre ellas, destacan: 1. Carga de gravedad:

$$\begin{aligned}
 CR1 &= 1.4D + 1.2P \\
 CR2 &= 1.2D + 1.4P + 1.6L + 0.5(L_r, S \text{ ó } R) \\
 CR3 &= 1.2D + 0.85P + 0.5(L \text{ ó } W) + 1.6(L_r, S \text{ ó } R)
 \end{aligned}$$

2. Carga de viento:

$$\begin{aligned}
 CR4 &= 1.2D + 0.85P + 0.5L + 1W + 0.5(L_r, S \text{ ó } R) \\
 CR6 &= 0.9D + 0.9P_{app} + 1W
 \end{aligned}$$

3. Carga de sismo:

$$\begin{aligned}
 CR5 &= (1.2 + 0.2S_{DS})D + (1.2 + 0.2S_{DS})\beta P + 0.5L + \rho E + 0.2S \\
 CR7 &= (0.9 - 0.2S_{DS})D + (0.9 - 0.2S_{DS})\beta P_{app} + \rho E
 \end{aligned}$$

4. Impacto de producto sobre las conexiones, brazos y vigas de soporte

$$CR8 = 1.2D + 1.6L + 0.5(S \text{ ó } R) + 1.4P + 1.6I$$

En donde:

*D*: carga muerta

*P*: carga máxima de los productos almacenados

*L*: cargas viva aparte de pallets

*E*: carga sísmica

*S*: carga de nieve

$\beta$ : coeficiente de carga del producto sísmico

$\rho$ : factor de redundancia para carga sísmica

*I*: carga de impacto en un brazo o estante

c. Cargas verticales: el reglamento *Specification for the Design, Testing Utilization of Industrial Steel Cantilevered Storage Racks* comenta que, para una fila de estantes de un solo lado, el estante con columnas en voladizo debe estar diseñado considerando que todos los brazos del estante poseen una unidad de carga. En el caso de los estantes doble cara, se deberá diseñar para las condiciones de carga más desfavorables, considerando que todos los brazos del estante de ambos lados estén completamente cargados, o bien, que únicamente un lado esté completo con mercadería mientras que el otro se encuentre vacío. Por el otro lado, los sistemas de almacenamiento en voladizo con amarre superior deben poseer elementos de amarre resistentes a la carga con el objetivo de que conecten cada columna en la dirección transversal del pasillo en el sistema. Dicha carga de diseño se desarrollará de la siguiente forma en el caso de sistemas de 2 a 4 filas:

- Caso de carga 1: cargar completamente todas las filas de un mismo lado únicamente.
- Caso de carga 2: cargar la primera fila completamente en ambos lados y completar únicamente para las filas posteriores un solo lado.

Para sistemas con más de 5 filas se diseñará con una fila completamente cargada en ambos lados y las cuatro filas restantes únicamente con un mismo lado cargado por completo.

d. Cargas de impacto:

- Impacto hacia abajo: los brazos en voladizo y las vigas transversales junto con sus conexiones finales deben diseñarse para una carga de impacto que ascienda al 25 % adicional de la carga unitaria manipulada por los brazos que transportan dicha carga.
- Impacto hacia arriba: los brazos y sus conexiones se deberán diseñar para resistir una fuerza igual al 25 % de la carga de diseño posicionada al centro del brazo, además de 1000 libras en la conexión del brazo a la columna pero no simultáneamente.
- Fuerzas horizontales: los arriostramientos y conexiones de las columnas se diseñan para fuerzas horizontales a lo largo del pasillo. El estante que soporta la unidad de carga debe resistir una fuerza horizontal del 50 % adicional de la fuerza axial mayor entre las fuerzas inducidas por el viento o bien, por sismos.

e. Cargas de viento: las fuerzas de viento que actúan sobre la estructura y los brazos serán determinadas en conformidad con la ASCE 7. Dicho análisis, se contemplará únicamente en áreas expuestas al viento, mientras que la cremallera debe permanecer en el rango elástico bajo dichas demandas.

f. Cargas sísmicas: se deberá de diseñar el estante en voladizo según las categorías de diseño sísmico mencionadas anteriormente con el objetivo de contemplar los efectos de un terremoto a través de las fuerzas laterales. Los estantes de almacenamiento deben ser consideradas, en conformidad con el código, como obras ordinarias.

- 1) Método de fuerza lateral equivalente: se contemplará la siguiente ecuación para el diseño de los estantes de almacenamiento en voladizo a la altura del nivel:

$$V = C_s I_p W_s$$

En donde:

$V$ : cortante de base sísmico

$C_s$ : coeficiente de respuesta sísmico

$I_p$ : factor de importancia, 1.0

$W_s$ : corte horizontal de la base: se empleará la siguiente fórmula:

- 2) Factor de redundancia ( $\rho$ ) El mismo, será considerado  $\rho=1.0$  para sismos categoría A,B,C, mientras que para sismos categoría D,E,F, se debe contemplar lo siguiente:

- Análisis sísmico de pasillo abajo: se emplea  $\rho=1.3$  en dicha situación con excepción al sistema de almacenamiento que posee una fila de estanterías con dos o más sistemas de arriostramiento vertical, en donde eliminar una riostra representa una pérdida de resistencia sísmica menor al 33 %, por lo que se emplea  $\rho=1.0$ .
- Análisis sísmico transversal: se emplea  $\rho=1.3$  en dicha situación con excepción al sistema de almacenamiento que posee bastidores con tres o más columnas en voladizo unidas entre sí por medio de un brazo horizontal.

- 3) Coeficiente de respuesta sísmica:

El código contempla la siguiente expresión:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R}$$

En donde:

$S_{DS}$ : respuesta espectral de diseño para periodos cortos

- 4) Diseño de parámetros de aceleración de respuesta espectral:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

En donde:

$S_{MS}$ : respuesta espectral máxima para períodos cortos. La cual se obtiene de la siguiente forma:

$$S_{MS} = F_a S_s$$

$S_{M1}$ : respuesta espectral máxima para períodos de 1 segundo. La cual se obtiene de la siguiente forma:

$$S_{M1} = F_a S_1$$

En donde:

$F_a$ : coeficiente de sitio, si se desconoce emplear sitio clase D

$F_v$ : coeficiente de sitio, si se desconoce emplear sitio clase D

$S_s$ : aceleraciones espectrales durante períodos cortos

$S_1$ : aceleraciones espectrales durante períodos de un segundo

- 5) Parámetros de diseño sísmicos: en orden de calcular los coeficientes necesarios para garantizar que la estructura presenta la capacidad de soportar las solicitaciones de carga contempladas, el código brinda la siguiente tabla con los parámetros de diseño sísmico aplicables R,  $\Omega_0$  y Cd:

TABLE 2.7.2.2.3 –Values of R,  $\Omega_0$  AND C<sub>d</sub>

|  | Seismic Design Category | R    | $\Omega_0$ | C <sub>d</sub> | Detailing Requirements |
|--|-------------------------|------|------------|----------------|------------------------|
| <b>Hot-rolled Steel</b>                          |                         |      |            |                |                        |
| Ordinary Moment Frame (cross-aisle)              | B or C                  | 3.0  | 3          | 3.0            | AISC 360 [2]           |
| Ordinary Moment Frame (cross-aisle) <sup>b</sup> | D, E or F               | 2.5  | 2          | 2.5            | AISC 341 [11]          |
| Ordinary Braced Frame (down-aisle)               | B or C                  | 3.0  | 3          | 3.0            | AISC 360 [2]           |
| Ordinary Braced Frame (down-aisle) <sup>b</sup>  | D, E or F               | 3.25 | 2          | 3.25           | AISC 341 [11]          |
| <b>Cold-formed Steel</b>                         |                         |      |            |                |                        |
| Ordinary Moment Frame (cross-aisle)              | B or C                  | 3.0  | 3          | 3.0            | AISI S100 [1]          |
| Ordinary Moment Frame (cross-aisle) <sup>a</sup> | D, E or F               | 1.0  | 1          | 1.0            | AISI S100 [1]          |
| Ordinary Braced Frame (down-aisle)               | B or C                  | 3.0  | 3          | 3.0            | AISI S100 [1]          |
| Ordinary Braced Frame (down-aisle) <sup>a</sup>  | D, E or F               | 1.5  | 1          | 1.5            | AISI S100 [1]          |

Cuadro 6

Tabla 2.7.2.2.3 ANSI MH16.3-2016

Fuente: ANSI MH16.3-2016, 2016

g. Diseño de elementos estructurales.

- 1) Diseño a flexión de columnas forjadas en frío: el código indica que el efecto en las perforaciones de las columnas de la estantería pueden obviarse si estas se encuentran

en dos filas en las almas, sin mencionar que la dimensión horizontal o vertical de los orificios no excede 1 pulgada, encontrándose distanciados a 3 pulgadas mínimo de centro a centro.

- 2) Diseño a compresión de columnas forjadas en frío: cabe mencionar, que si el efecto de las perforaciones se obviase, es necesario contemplar la resistencia axial nominal como 0.85 veces  $P''$ .
- 3) Empalmes de las columnas: los mismos, son los encargados de resistir los esfuerzos y momentos ubicados de forma interna en la columna para posteriormente transferirla a los demás elementos estructurales. Los ejes centroidales de los empalmes deben coincidir los con la columna, evitando cualquier desestabilización estructural. De no ser así, se debe considerar la excentricidad para los cálculos estructurales, puesto que las conexiones deben mantener las secciones de la columna alineadas para lograr integridad, ya sea con sujetadores o bien soldaduras (AISI 2017, 2017).
- 4) Bases de columnas y placas: el código, menciona que todas las columnas en boladizo de los sistemas de almacenamiento deben estar conectadas ya sea a un miembro base o bien, a una placa base. Esto, para asegurarse que sean capaces de transmitir las cargas verticales a la losa de cimentación. Para ello, es necesario relacionar la resistencia portante de diseño de la siguiente manera:

$$P_p \leq 1.7f'_c A_{\text{Área de apoyo efectiva}}$$

En donde:

$f'_c$ : resistencia mínima a la compresión de 28 días de la losa del piso de concreto

**3. AISI 2017:** hace referencia al manual de diseño de acero conformado en frío elaborado por el Instituto Americano del Hierro y el Acero, el cual abarca el diseño de miembros estructurales como vigas, columnas y conexiones. El mismo, contempla las disposiciones para el análisis de resistencia directa de los elementos interrelacionados en las edificaciones. El manual, brinda dimensiones y propiedades de los perfiles estructurales empleados comúnmente en el diseño y construcción de edificios de acero. Dichas propiedades, se encuentran tabuladas en la Tabla 1-1. Dentro de las cuales se pueden mencionar las formas: W, M, S y HP.

- W: poseen superficies paralelas tanto interior como exteriormente.
- M: son miembros en forma de H que no se encuentran clasificados en la ASTM A-6 dentro de las formas convencionales como W, S o HP. Dichas formas M, poseen una cara interior con ala inclinada entre otras características que no las hacen clasificables dentro de las otras categorías (AISI 2017, 2017).
- S: son reconocidas como vigas estándar americanas, las cuales poseen una pendiente de aproximadamente 2 sobre 12 en las superficies internas del ala.
- HP: son reconocidos como pilotes de soporte, los cuales son similares a la forma W, con excepción en las alas y almas, las cuales tienen un mismo espesor, sin mencionar que la profundidad y el ancho del ala suele tener la misma magnitud.

Comúnmente las formas de los perfiles se designan con la marca W,M,S o HP, luego de la profundidad nominal en pulgadas, seguido del peso nominal en lb/pie. Por ejemplo, el perfil W24X55 hace referencia a la forma W con 24 pulgadas de profundidad y 55 lb/pie.

Canales:

- C: comúnmente, son reconocidas como canales estándar americanos que poseen una pendiente aproximada de 2 sobre 12 en la superficie interna de las alas.
- MC: dichos perfiles, son reconocidos como canales varios al poseer una pendiente distinta a 2 sobre 12 en la superficie interna de las alas.

Estas formas, se designan con la marca C o MC, seguido de su profundidad nominal en pulgadas y el peso nominal en lb/pie. Por ejemplo, el perfil C12X25 es de forma C y posee nominalmente 12 in de profundidad y pesa 25 lb/pie.

Los ángulos son designados por la letra L. Los mismos, poseen patas de igual espesor con tamaños tanto iguales como desiguales. Seguido de la designación L está el tamaño de las patas y el grosor, ambas en pulgadas. Por ejemplo, L4X3X1/2 es un ángulo con un cateto de 4in, seguido de uno de 3 in y 1/2in de espesor (AISI 2017, 2017).

Secciones estructurales huecas (HSS):

- HSS rectangular: se caracteriza por tener una sección transversal rectangular, con excepción a las esquinas redondeadas y un espesor de pared uniforme con excepción a las costuras de soldadura.
- HSS cuadrado: se caracteriza por poseer una sección transversal cuadrada, con excepción a las esquinas redondeadas y un espesor de pared uniforme menos las costuras de soldadura.
- HSS redondo: tiene una sección transversal redonda y un espesor de pared uniforme excepto en las costuras de la soldadura.

(AISI 2017, 2017)

**4. AISC360-16:** contempla las disposiciones sísmicas para concebir, analizar y dimensionar edificios de acero estructural y sus determinadas conexiones contempladas para soportar las fuerzas y deformaciones constantes de la estructura. También, contiene datos y recomendaciones para tratar las deformaciones inelásticas autolimitadas de las mismas conexiones.

a. Diseño estructural y especificaciones: es importante realizar el diseño de la estructura de acero en orden de que no exceda ningún estado límite de resistencia, por lo que la misma debe ser capaz de cumplir con las solicitaciones de carga aplicables. Lo anterior, debe basarse de acuerdo a las disposiciones para el diseñador de factor de carga y resistencia (LRFD).

- 1) Diseño para resistencia utilizando el diseño de factores de carga y resistencia (LRFD): se debe asegurar que la resistencia de diseño de cada componente estructural iguale o excede la resistencia requerida por la estructura obtenida a través de las combinaciones de carga. Para ello, se contempla la siguiente expresión:

**Ecuación No.10.** Resistencia requerida

$$R_u \leq \phi R_n$$

En donde:

$R_u$ : resistencia requerida obtenida por combinaciones de carga

LRFD

$R_n$ : resistencia nominal

$\phi$ : factor de resistencia

$\phi R_n$ : resistencia de diseño

- 2) Diseño de conexiones: el diseño de conexiones debe ser coherente con las suposiciones realizadas en el diseño de la estructura, autorizando las deformaciones inelásticas autolimitadas de las conexiones. Cabe mencionar, que se debe restringir contra la rotación en el eje longitudinal los puntos de apoyo, vigas y armaduras.

Entre ellas, destacan las conexiones simples. Se debe suponer para efectos del análisis estructural que las conexiones simples permiten una rotación relativa sin restricciones entre los elementos estructurales conectados. Para fines del trabajo de graduación, se reconocen dos tipos de conexiones de momento:

- Conexiones de momento totalmente restringidas: dicha conexión al estar restringida de forma completa, transfiere momento de forma insignificante entre los miembros conectados. Por lo que se puede realizar la suposición que la conexión no permite la rotación relativa.
- Conexiones de momento parcialmente restringidas: las mismas, transfieren momentos siendo la rotación entre los miembros estructurales no despreciable. Por lo que se recomienda documentar las características de respuesta fuerza-deformación de la conexión para asegurarse de que posean suficiente rigidez, resistencia y capacidad de deformación.

- 3) Secciones para pandeo local: para las secciones que se encuentran a compresión axial, la norma establece la clasificación de secciones para elementos no esbeltos, que a través de la Tabla B4.1a del AISC 2016, evalúa las relaciones ancho-espesor de los elementos comprimidos. Por el otro lado, la Tabla B4.1b, clasifica las secciones sujetas a flexión, las cuales pueden ser compactas, no compactas o de elementos esbeltos, según la conexión entre el alma y las alas.

b. Diseño por estabilidad. En cuanto a los requerimientos, se debe contemplar las deformaciones de los miembros por flexión, corte y axial, las cuales contribuyen al desplazamiento de la estructura. Lo anterior, estipula el código que sea calculado a un nivel de carga correspondiente a las combinaciones de carga LRFD. También, menciona que el

método de diseño de análisis directo está permitido para todas las estructuras, tanto para aquellas cuyo diseño se base en el análisis elástico como el inelástico. Para ello, el código destaca lo siguiente:

- **Diseño a tensión:** El diseño a tensión, en conformidad con la normativa, será definido por el menor valor entre los estados límites de fluencia a tracción en la sección bruta y de rotura a tracción en la sección neta. Siendo estos los siguientes:

- Para fluencia por tracción

$$P_n = F_y A_g$$

$$\phi_t = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

- Para rotura por tracción

$$P_n = F_u A_e$$

$$\phi_t = 0.75 \text{ (LRFD)}$$

En donde:

$A_e$ : área neta efectiva,  $in^2$   
 $A_g$ : área bruta del miembro,  $in^2$   
 $F_y$ : límite elástico mínimo específico, ksi  
 $F_u$ : resistencia a la tracción mínima específica, ksi

$$A_e = U A_n$$

En donde:

$A_e$ : área neta efectiva,  $in^2$   
 $U$ : factor de retraso de corte  
 $A_n$ : área neta del miembro,  $in^2$

c. Diseño a compresión: en orden de determinar la resistencia de diseño a compresión,  $\phi_c P_n$ , y la resistencia a compresión permitida,  $\frac{P_n}{\Omega_c}$ , se evaluarán los estados límites aplicables del pandeo por flexión, torsión y flexo-torsión para identificar el menor valor de  $P_n$ . También, se deben respetar los siguientes requerimientos:

- Los elementos estructurales compuestos por dos o más formas se deben conectar entre sí a intervalos de forma que la relación de esbeltez  $\frac{a}{r_i}$ , de cada uno no exceda tres cuartos de veces el valor gobernante del miembro armado. Dicha relación de esbeltez de cada pieza, será conformada por el menor radio de  $r_i$ .

- La soldadura en los extremos de los miembros construidos deben conectar todos los componentes en contacto entre sí. Para ello, la soldadura debe tener una longitud mínima del ancho máximo del miembro. Además, el esparcimiento longitudinal de soldaduras debe ser adecuado para proporcionar la resistencia requerida. Por ejemplo, para un componente de un miembro a compresión con placa exterior, se recomienda que el esparcimiento máximo no exceda el espesor de la relación entre la placa exterior más delgada por un factor de  $0.75 \frac{E}{F_y}$ , o bien 12in.
- Los lados abiertos de los miembros a compresión construidos a partir de placas o perfiles deben estar provistos de placas de cubierta continuas perforadas a través de una sucesión de orificios de acceso. El código menciona que el ancho sin soporte de dichas placas en los orificios de acceso contribuye a la resistencia disponible, siempre y cuando se cumpla con las limitaciones de la relación ancho-espesor, la relación entre la longitud y el ancho del agujero, la distancia libre entre orificios y la periferia de los agujeros.

d. Diseño a flexión: la resistencia a flexión de diseño,  $\phi_b M_n$ , y la resistencia a flexión admisible,  $\frac{M_n}{\Omega_b}$ , será determinada según las estipulaciones del código:

- Se considerará para efectos de los cálculos  $\phi_b = 0.90$  (LRFD).
- Se supondrá que los puntos de apoyo de vigas están restringidos contra la rotación alrededor de su eje longitudinal.
- En elementos monosimétricos sujetos a flexión por curvatura inversa, se deberá comprobar la resistencia al pandeo lateral para ambas alas.

e. Diseño inelástico: el código destaca que el análisis inelástico deberá contemplar las deformaciones de los miembros por flexión, corte, axial y torsión, además de todas aquellas deformaciones que contribuyan al desplazamiento de la estructura. También, se toma en consideración aquellos efectos de segundo orden como  $P-\Delta$  y  $P-\delta$ . Sin mencionar, las imperfecciones geométricas. Otro aspecto a considerar son las reducciones de rigidez a causa de la inelasticidad. En cuanto a la ductilidad, se debe demostrar el comportamiento consistente, ya que no se permite la redistribución de fuerza a causa de un elemento o conexión. Además, se permite cualquier método que utilice análisis inelástico para proporcionar miembros y conexiones para satisfacer estos requisitos generales. En orden de asegurar la ductibilidad en elementos comprimidos con bisagras de plástico, la resistencia de diseño en compresión no deberá exceder de  $0.75 F_y A_g$ . (AISC360-16, 2016)

## VI. METODOLOGÍA

Con el objetivo de examinar la viabilidad técnica y estructural de una bodega autoportante que cumpla con los requerimientos de las normativas vigentes locales, se desempeñó el trabajo de graduación en las siguientes catorce fases dependientes:

### A. Recopilación de datos

La primera fase del proyecto consta de la exploración de alternativas dentro de las normativas vigentes locales como: las Normas de Seguridad Estructural (NSE), el *American Institute of Steel Construction* (AISC), los reglamentos de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles y el Código Internacional de Construcción (IBC). Esto, con la finalidad de verificar si la estructura autoportante está clasificada dentro de las regulaciones para poder analizar su viabilidad técnica.

Para efectos del trabajo de graduación, se empleó el Manual Básico de Formación para Rack Selectivo-México- emitido por Mecalux, la cual es una empresa líder en el diseño, fabricación, comercialización y prestación de servicios relacionados con estanterías mecánicas. El mismo, fue desarrollado en base al *Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, and Ultra-High Strength (ASTM A1011/A1011M-18a)*. Dicho manual, brinda un instructivo para determinar el modelo a emplear basado en las sollicitaciones de carga. En el caso de las estanterías, la unidad de almacenamiento juega un papel preponderante en la definición del perfil a utilizar tanto en los bastidores como en los puntales y diagonales, además de las placas que se encuentran soldadas al puntal. Cada uno de los perfiles de acero a emplear poseen una combinación óptima que conforma los bastidores y sus componentes. Es decir, al seleccionar un perfil de puntal, se debe realizar una combinación específica de perfiles correspondientes a las diagonales, unión pie-puntal y pie de gran carga. En el caso de la bodega autoportante del trabajo de graduación, se optó por emplear un puntal TD U122, el cual utiliza diagonales U96 415 G.

El manual, también incluye las dimensiones de cada modelo de puntal y diagonales, dependiendo del espesor de chapa empleado; puesto que de dicha elección depende la resistencia, durabilidad y seguridad del proyecto. Asimismo, contempla la posición de cada uno de los elementos de las estanterías. Además, indica la tornillería y diagonal a utilizar según el modelo de puntal, como también la cantidad y distancia de las mismas para unir puntales entre sí contemplando la altura de la estructura. Por el otro lado, el manual facilita la forma óptima para anclar los bastidores compuestos por dos puntales, lo cual fue de gran utilidad para el modelado de la estructura en el *software* computacional. Dicho manual, detalla las propiedades tanto mecánicas y los requisitos de soldadura de cada uno de los perfiles para puntales, diagonales, separadores y pies de gran carga, dentro de los cuales destacan: el tipo U122, U96 C415 y C418.

Adicionalmente, es necesario asignar una clase de sitio en donde se ubican las bodegas con el fin de realizar un análisis sísmico realista. A través de la norma NSE-2, se contemplan las propiedades físicas y mecánicas del terreno en donde se construirá. Por lo que primero se ubicará la obra dentro de la clasificación de la norma para determinar si el suelo

es tipo A, B o C, y por ende, los coeficientes que deberán tomarse en consideración para obtener el espectro sísmico.

Otro factor importante para la elaboración del trabajo es la comparación de la bodega autoportante con las solicitaciones de una nave industrial convencional. Para ello, se solicitó el trabajo de graduación de Ivan Porras en donde se realizó el modelamiento, análisis y diseño estructural de una nave industrial. Este trabajo, se utilizó como referente para evaluar la viabilidad de la bodega autoportante al mantener las dimensiones y perfiles de acero empleados en el análisis.

## B. Definición de la geometría de la estructura y propiedades de las conexiones

En esta sección se establece la distribución y predimensionamiento de los elementos estructurales de la bodega autoportante. Como se mencionó anteriormente, se conservará la extensión definida en el trabajo de graduación empleado como referencia, al igual que la longitud de los elementos estructurales, la pendiente de la cubierta y separación entre los marcos.

En conformidad con el trabajo de graduación del Ingeniero Jorge David Andersson Reinos (2021) denominado *Análisis y diseño estructural de una nave industrial mediante métodos numéricos y simulaciones 3D*, se analizó una bodega autoportante con las mismas dimensiones para realizar un análisis comparativo en términos de peso. La misma, consta de 3 ejes longitudinales formado por 3 marcos de riostras concéntricas de baja ductilidad, además de 7 ejes transversales que cuentan con 7 marcos de baja ductilidad. La bodega, posee un área de 1470 m<sup>2</sup>, con un largo de 42m y 35m de ancho, mientras que la altura a la cumbrera asciende a 12m.



Figura 15. Grilla para modelado

Fuente: Elaboración propia

Al establecer las dimensiones de la estructura, se procedió modelando la misma en el programa informático ETABS20. Para ello, es necesario definir el material base. En el caso de la bodega autoportante, se optó por emplear para los puntales SS G55 y para los largueros HSLAS G55 C2, los cuales están detallados en la ASTM A 1011 *Hot-rolled steel sheet and strip*. En el caso de las costaneras se optó por emplear un acero A36. La Figura No.30 muestra el modelo de la bodega autoportante.

Otro aspecto a considerar es homogeneizar el giro de la empresa para ambas bodegas, puesto que se desea obtener dos panoramas cuyas condiciones iniciales sean idénticas para poder facilitar la comparación de los resultados. En este caso, se determinó que la bodega almacenará tarimas de 1.22x0.85x1.0m, las cuales se emplearán para almacenar 500 cajas de lápices por tarima.

### C. Solicitaciones de cargas gravitacionales y de viento

Para evaluar la viabilidad técnica, se estableció a qué cargas está sujeta la estructura. En el caso de la carga muerta, se contempló el peso por unidad de longitud del cerramiento empleado para cubrir la bodega, al igual que el peso propio de los elementos estructurales como vigas y columnas.

En este caso, se contempló que los paneles que recubren la bodega están compuestos por lámina. Por lo que se le asignó una carga permanente de  $20 \text{ kgf/m}^2$ , la cual corresponde a  $10 \text{ kgf/m}^2$  de lámina y tornillería, además de  $10 \text{ kgf/m}^2$  de instalaciones eléctricas e hidráulicas. Mientras que en el panel que se encuentra en los costados de la bodega únicamente se consideró  $10 \text{ kgf/m}^2$  de lámina y tornillería. Con respecto a la carga viva, el AGIES NSE 2-2018 en el capítulo No.3, establece una carga de  $50 \text{ kgf/m}^2$  correspondiente a cubiertas livianas, la cual aplica a estructuras que soporta la cubierta final. Además, para el análisis gravitacional, se consideró el 100 % del peso las tarimas para el análisis gravitacional, el cual ascendió a  $25.29 \text{ kgf-s}^2/\text{m}$ .

También, dentro de las cargas accidentales se consideró la carga de viento conforme a la *Norma de Seguridad Estructural para Guatemala* (NSE 2-2018) para superficies verticales e inclinadas contemplando que la cubierta posee una pendiente de 11.42 %. El capítulo 5 solicita clasificar la estructura según su exposición al viento, por lo que al encontrarse ubicada en la Ciudad de Guatemala se catalogó con exposición tipo B, la cual indica: *El 80 % del cuadrante a barlovento será urbano con edificaciones de un nivel o más o bien bosques u otras irregularidades superficiales significativas que se extienden más de 1500 metros del sitio del proyecto* (AGIES NSE 2-18, 2018). También, se determinó que la velocidad del viento por la ubicación es de 100 kph, asumiendo una ubicación en la Ciudad de Guatemala, y la altura promedio de la estructura es de 11m con un factor de importancia ( $I_c$ ) igual a 1.0.

Para efectos del trabajo de graduación, se empleó el sistema resistente principal para definir el coeficiente ( $C_q$ ) para superficies verticales, el cual para barlovento asciende a 0.8 empuje y a sotavento a 0.5 succión. Para el caso del techo inclinado, la bodega cuenta con una pendiente de 11.42 %, por lo que al ser menor que el 17 % únicamente cuenta con succión de 0.7. Sin embargo, se adicionó 0.5 ya que el AGIES definió como permeable a

una estructura si el 15 % del área a barlovento entre los soportes de la fachada que habría de estar cerrada en el sector es menor que el área de aberturas en el mismo. Por lo que, se definió como 1.2, al igual que el sotavento. Luego, se procedió a obtener la magnitud de la fuerza contemplando el área tributaria en la superficie vertical, siendo en el eje x 8.75 m en el centro y 4.375 m en las esquinas de los marcos concéntricos BD. Mientras que en el eje y, el área tributaria asciende a 3 m en el centro de los marcos y 1.5 m en las esquinas. Por el otro lado, en la estructura del techo se empleó un área tributaria de 1.04m en el centro que es la separación entre correas.

#### D. Solicitaciones de carga sísmica

Tal y como se mencionó en el apartado de *Unidad de carga* en el Marco Teórico, para el análisis estructural de la edificación se considerará la carga producida por el uso de la bodega, al igual que las procedentes de los mantenimientos de las cubiertas.

Para el cálculo, se determinó que el largo del larguero que se encuentra entre los bastidores es de 3 m, por lo que se contempló que el montacargas toma la tarima del lado de los 1.22 m, definiendo que se colocarán dos tarimas por larguero con una altura total de 1m con un volumen de 1.037 m<sup>3</sup>. Siendo el volumen total de 2.074 m<sup>3</sup> almacenado por larguero. Para dimensionar la magnitud de la masa, se determinó que la densidad de la caja de lápices Mongol es de 0.48 kgf/m<sup>3</sup>, por lo que 500 cajas ascenderían a 240 kgf/m<sup>3</sup>. Se empleó la fórmula de la densidad para encontrar la masa:

**Ecuación No.13.** Masa requerida

$$m = vd$$

En donde:

v: volumen

d: densidad

m: masa

De esta forma, se obtuvo que la masa de las 500 cajas de lápiz mongol ascendía a 497.76 kg ubicada en el larguero de 3 m de largo con 90 cm de profundidad, por lo que por unidad de área poseía 184.35 kgf/m<sup>3</sup>. Luego, a través del área tributaria de las estanterías, se obtuvo la fuerza de la masa adicional que se debía aplicar en los nodos de unión de las columnas y las vigas, con un total de 248 kg.

Para el cálculo de la masa sísmica, se consideró la carga de las tarimas, incluyendo la mercadería, como carga muerta en lugar de viva. Esto, es debido a que las tarimas no deben moverse respecto a la estructura durante un evento sísmico para evitar su colapso. Por lo tanto, se tiene que considerar en el modelo para representar adecuadamente la magnitud de las fuerzas inerciales.

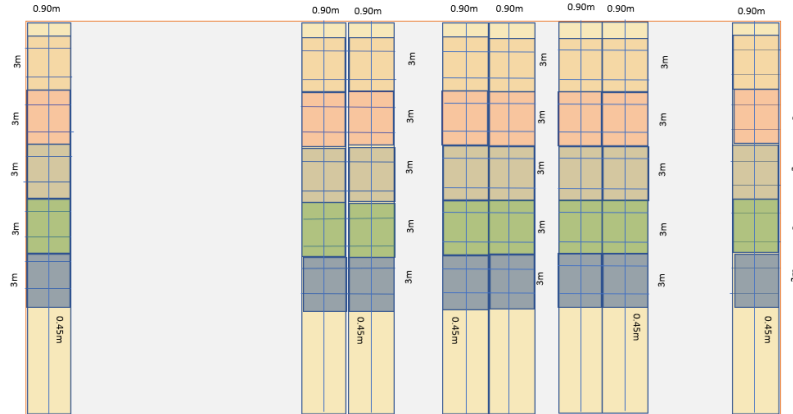
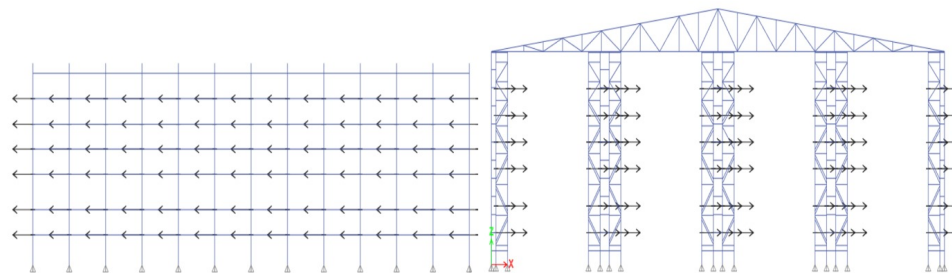


Figura 16. Área tributaria

Fuente: Elaboración propia

Al obtener la masa sísmica, se procedió a asignarla en el modelo estructural. La misma, se asignó de tres distintas formas para determinar el caso genera el efecto más crítico en la respuesta sísmica de una bodega autoportante. El Caso 1, corresponde a la bodega autoportante al máximo de su capacidad ocupando las 924 posiciones.



(a) Elevación eje 18

(b) Elevación eje x

Figura 17. Caso 1: capacidad al 100 % isométrico

Fuente: Elaboración propia

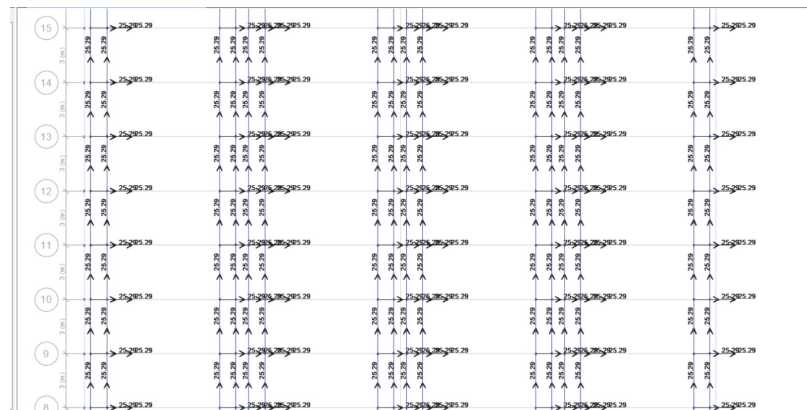


Figura 18. Caso 1: capacidad al 100 % planta

Fuente: Elaboración propia

En el caso 2, se ocuparon los últimos 3 niveles de cada una de las estanterías, los cuales ascienden a 462 posiciones, para generar el estado más crítico de volteo.

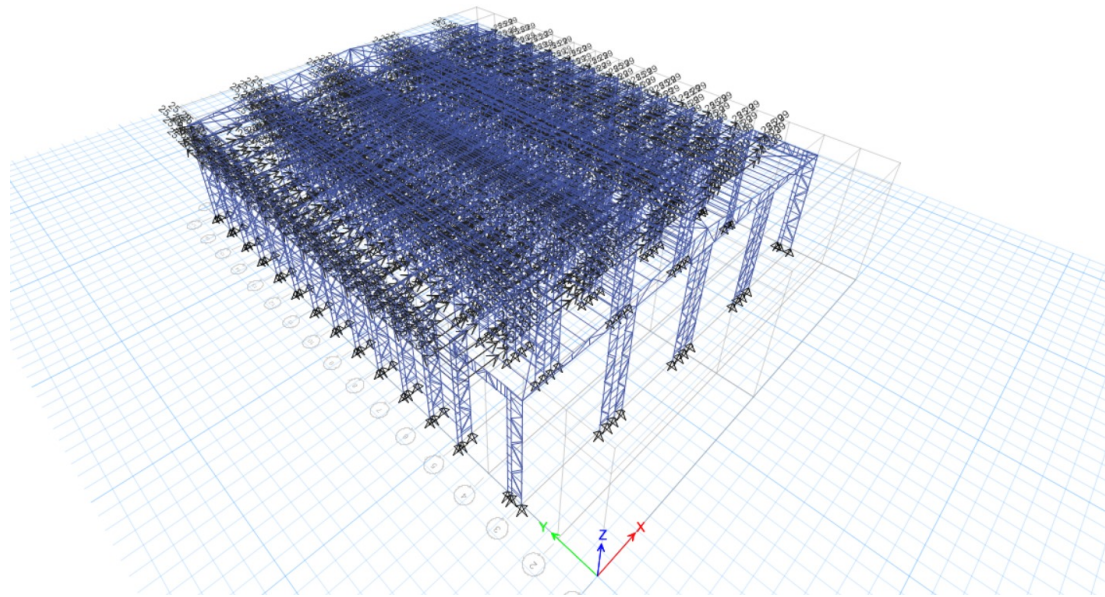


Figura 19. Caso 2: ocupación de los últimos 3 niveles

Fuente: Elaboración propia

En el caso 3 se ocuparon 420 posiciones, siendo asignada la masa adicional en todos los niveles de la estantería pero únicamente en la mitad de la bodega entre los ejes número 13 a 17 y los ejes letra del A al C para generar el estado más crítico de torsión.

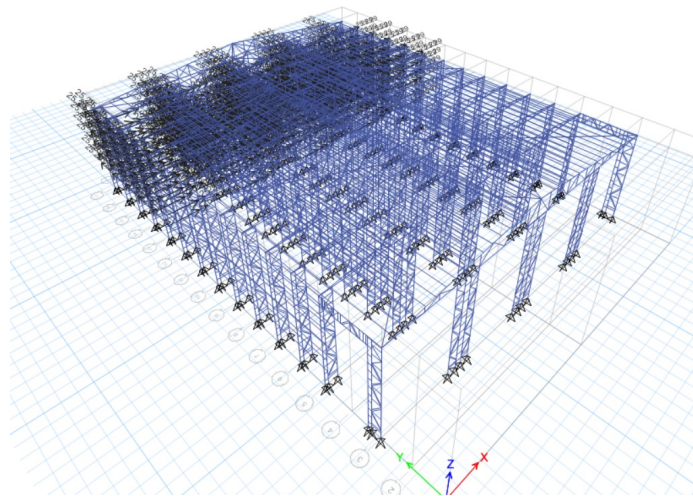


Figura 20. Caso 3: capacidad al 50 % planta

Fuente: Elaboración propia

Además, se agregó la masa adicional en el techo correspondiente al peso de la lámina, tornillería e instalaciones hidráulicas y eléctricas. Para ello, se contemplaron los  $20 \text{ kgf/m}^2$  para asignarlos a las costaneras que se encuentran a 1.04 m de distancia entre ellas.

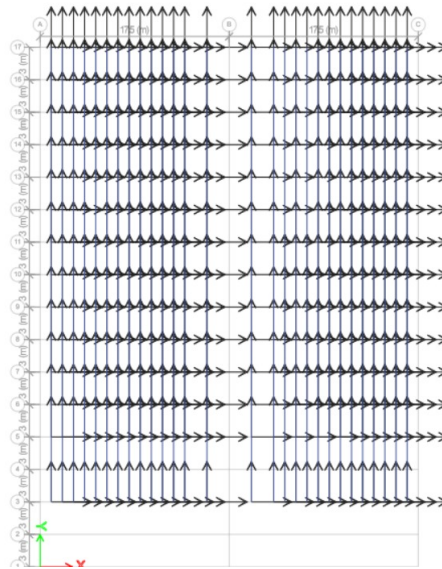


Figura 21. Masa adicional costaneras  
Fuente: Elaboración propia

## E. Fuerzas sísmicas

El análisis de fuerzas sísmicas para la modelación de la bodega autoportante partió de la formulación del espectro. Para ello, se empleó la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala NSE-2 emitida en 2018. La misma, brinda los parámetros básicos a través del Listado de Amenaza Sísmica por Municipio. Se emplearon los siguientes parámetros para el municipio de la Ciudad de Guatemala:

- $I_o$ : 4.2
- $S_{cr}$ : 1.5g
- $S_{1r}$ : 0.55g
- $T_L$ : 3.26

Luego, se determinó a través de la Tabla 3-1 de la NSE 2-18 detallada en el cuadro No.5 el factor  $k_d$  igual a 0.8 para un nivel de sismo severo con 5 % de probabilidad de ser excedido en 50 años. El código también proporciona los coeficientes de sitio para períodos de vibración cortos y largos, además del coeficiente por proximidad de las amenazas especiales para períodos cortos y largos.

Posteriormente, a través de la ecuación No.5 y No.6 se obtuvo la ordenada espectral de sismo extremo de 1.5 y la ordenada espectral de sismo con duración de 1 segundo de 0.935. Lo anterior, se emplea para obtener las ordenadas espectrales de sismo de diseño al relacionar el factor  $k_d$ , la cual equivale a 1.2; mientras que la ordenada de diseño de 1 segundo es igual a 0.748.

Finalmente, los valores obtenidos anteriormente se emplearon para obtener los períodos de vibración de transición determinados para obtener los puntos críticos que permiten graficar un espectro sísmico preciso con un período de vibración variable. Por medio de la ecuación No.8, se obtuvieron los siguientes puntos:

- $T_s$ : 0.62s
- $T_0$ : 0.12s
- $T_L$ : 3.26s

Posterior a la obtención de los puntos críticos, se calculó la pseudoaceleración para cada período, el cual oscila entre un rango de 0.00 a 5 en intervalos de 0.01 empleando como determinantes  $T_s$ ,  $T_0$  y  $T_L$ . Para efectos del trabajo de graduación, el espectro sísmico empleado es el siguiente:

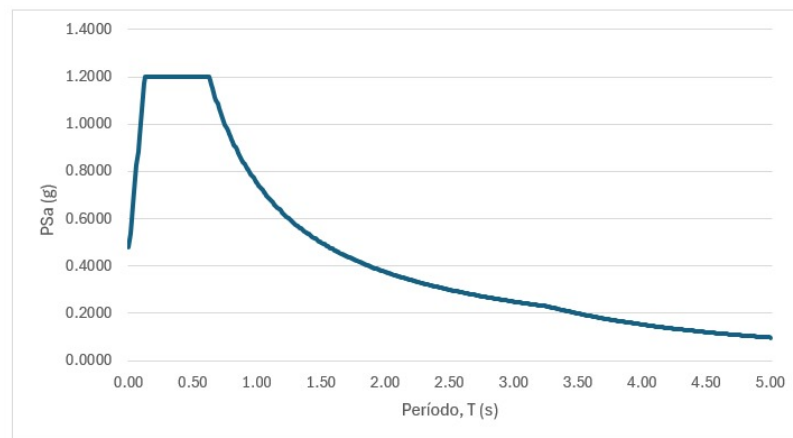


Figura 22. Espectro sísmico

Fuente: Elaboración propia

## F. Modelo estructural

Como primer paso, se crearon las grillas para facilitar el modelado de la bodega autoportante. Se definieron 3 ejes en sentido longitudinal con un espaciamiento de 17.5m, mientras que en sentido transversal se definieron 17 ejes con un espaciamiento de 3 m. Dichos ejes se identificaron con las letras A, B y C y con los números del 1 al 17 respectivamente. Para la altura, se definieron dos *stories* la primera, *Story1*, se creó con 10 m de altura con el objetivo de facilitar el modelado de las columnas, y la *Story2* posee 2 m de altura para el techo de la estructura, el cual contará con tijeras.

Al establecer el tipo de obra y ubicación, las cargas a resistir, el tipo de perfil utilizado, y por ende, el arriostramiento y conexiones necesarias, se procederán a modelar consolidando la estructura en el programa ETABS 2020. A través del mismo, se generó la integración de la carga sísmica, de viento y tefra. Posteriormente, se obtuvieron los desplazamientos generados debido a las solicitaciones mencionadas. Asimismo, se verificó la capacidad de los miembros estructurales y las derivas.

Como se mencionó anteriormente, en el caso de las columnas, se optó por el perfil U122 fabricado con el material SS G55, mientras que para las diagonales se empleó el perfil U96 415 G con el material HSLAS G55 C2. Sin embargo, la librería de ETABS 2020 no cuenta con dichos perfiles, por lo que se optó a modelarlos a través de *section designer* por medio de puntos de referencia para después trazar una polilínea. Las medidas se extrajeron del manual anteriormente mencionado, y se comprobó que la inercia real según el documento no variara por más del 10 %, siendo la diferencia de 5.64 %, considerando que la inercia proporcionada por el *software* de 0.000001 m<sup>4</sup>. Luego, se procedió a editar la posición del perfil de modo que coincidiera con lo detallado en el Manual Básico de Formación para Rack Selectivo-México.

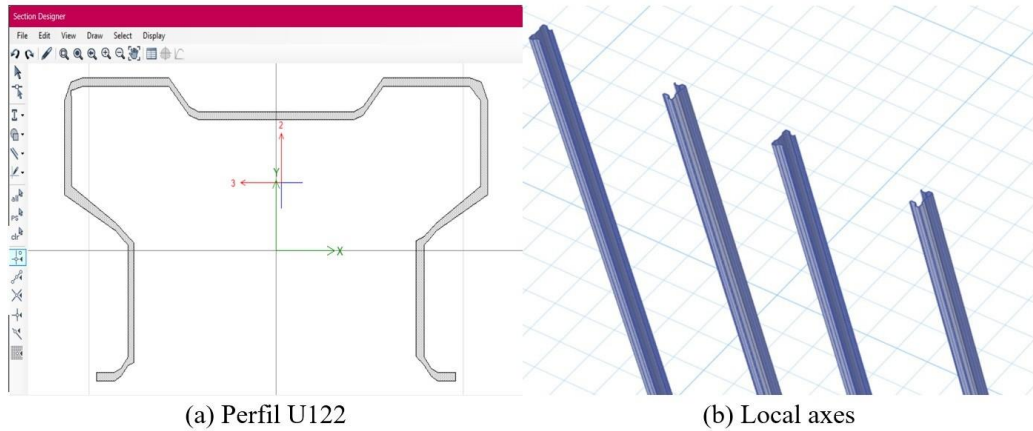


Figura 23. Perfil U122

Fuente: Elaboración propia

También se definió el material base a través de la opción de propiedades de materiales. Para ello, se empleó la ficha técnica desarrollada en la normativa ASTM A1011, la cual indica el esfuerzo de tensión mínimo y el mínimo esfuerzo de fluencia. Luego, para  $F_{ye}$  y  $F_{ue}$  se multiplicó los valores anteriormente mencionados por 1.1.

| Grado                  | Espesor (in) | Límite de fluencia (min ksi) | Resistencia a la tracción (min ksi) | Límite de elasticidad aparente (min %) |
|------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------------|--|
| HSLAS Grado 55 Clase 1 | 0.079-0.229  | 55                           | 70                                  | 20                                     |

Cuadro 7

Propiedades mecánicas SS Gr55 AST1011

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

Al ingresar la información apropiada, ETABS2020 proporcionó las siguientes propiedades:

| Propiedad | Perfil U122 |
|-----------|-------------|
| $I_x$     | 0.000001    |
| $I_y$     | 2.172E-07   |
| $S_x$     | 0.000014    |
| $S_y$     | 0.000005    |
| $A$       | 0.000500    |
| $J$       | 5.53E-10    |

Figura 24. Propiedades Perfil U122  
Fuente: Elaboración propia

En el caso de las diagonales, se empleó el perfil U96 415 G con el material HSLAS G55. Se modeló de la siguiente forma con la opción *Section Designer* de ETABS 2020:

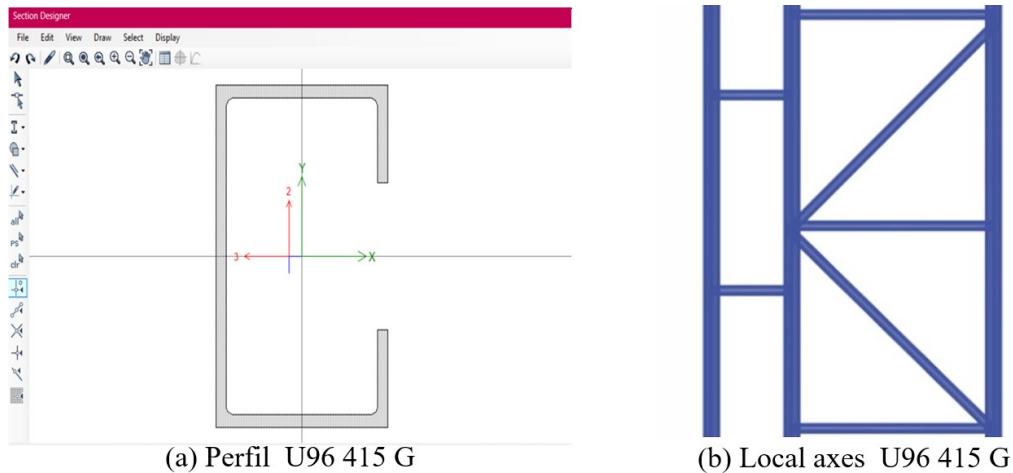


Figura 25. Perfil U96 415 G

Fuente: Elaboración propia

Al igual que para el perfil U122, se definió el material base a través de la opción de propiedades de materiales. Para ello, se empleó la ficha técnica desarrollada en la normativa ASTM A1011, la cual indica el esfuerzo de tensión mínimo y el mínimo esfuerzo de fluencia. Luego, para  $F_{ye}=50$  ksi y  $F_{ue}=55$  ksi se multiplicó los valores anteriormente mencionados por 1.1.

| Grado                  | Espesor (in) | Límite de fluencia (min ksi) | Resistencia a la tracción (min ksi) | Límite de elasticidad aparete (min %) |
|------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| HSLAS Grado 50 Clase 1 | 0.188-0.229  | 50                           | 65                                  | 22                                    |

Cuadro 8

Propiedades mecánicas HSLAS-F Gr50 AST1011

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

Luego, también se procedió a editar la posición del perfil de modo que coincidiera con lo detallado en el *Manual Básico de Formación para Rack Selectivo-México*. Para ello, se

empleó la opción de *Local Axes* que permite realizar rotación por ángulo de modo que las diagonales se posicionaran de forma intercalada tal y como se puede observar en la Figura No. 25.

En el caso de las vigas, se recomendó emplear en conformidad al Manual vigas de 150x50mm fabricadas con el material HSLAS G55 en conformidad con la normativa ASTM A 1011. También, se creó el perfil con la opción de *Section Designer* para lo cual se elaboró un cuadrado de 150x50mm con un espesor de 10 cm empleando la opción de *Draw Tube*.

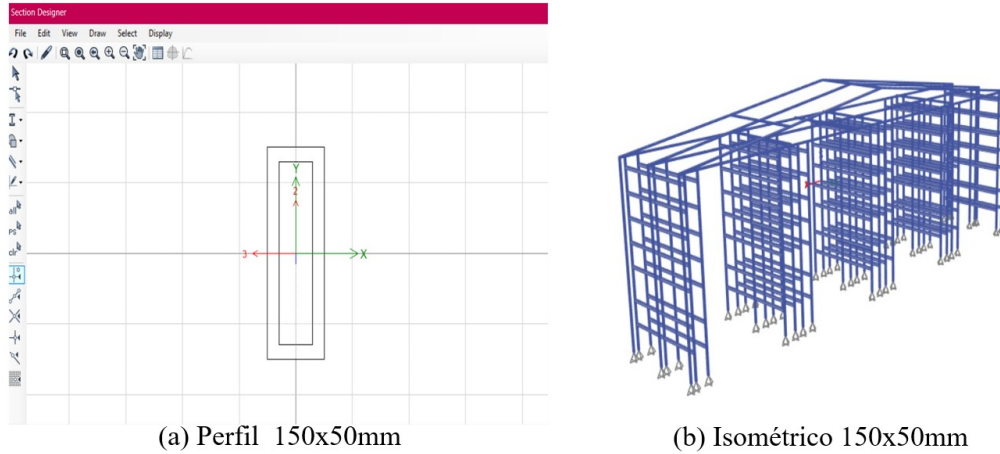


Figura 26. Viga 150x50mm

Fuente: Elaboración propia

Por último, se dibujaron las costaneras para el modelo en ETABS2020, empleando el perfil C2X8X1.8mm, para el cual se optó por emplear *Cold Form C Shape* para dibujar una sección de canal. En este caso en particular, se ingresaron las siguientes dimensiones:

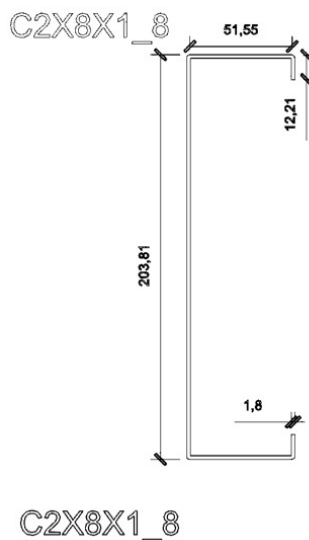


Figura 27. Viga 150x50mm

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las costaneras, se cambió el *Insertion Point* a la opción 2 *Bottom Center* para que las costaneras se visualizaran encima de las tijeras, respetando la pendiente.

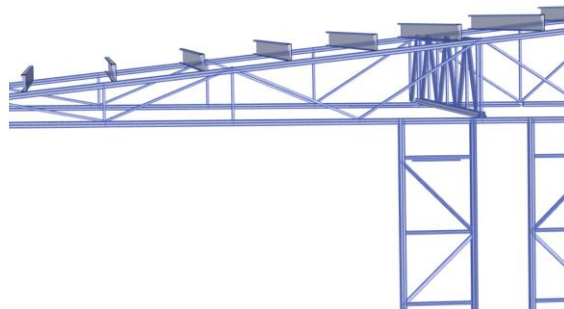


Figura 28. Costanera 2x8x1.8mm  
Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto que se modeló fueron las articulaciones de los extremos de cada uno de los elementos estructurales. Por ejemplo, en el caso de las columnas se eliminaron los *end releases* considerando que ya contaban con restricción en la traslación en X, Y y Z. Sin embargo, a las diagonales y costaneras denominadas con el perfil U96 415G y C2X8X1.8mm respectivamente se les restringió con *frame releases* en *Moment22* y *Moment33*. Se visualizan los elementos de la siguiente manera:

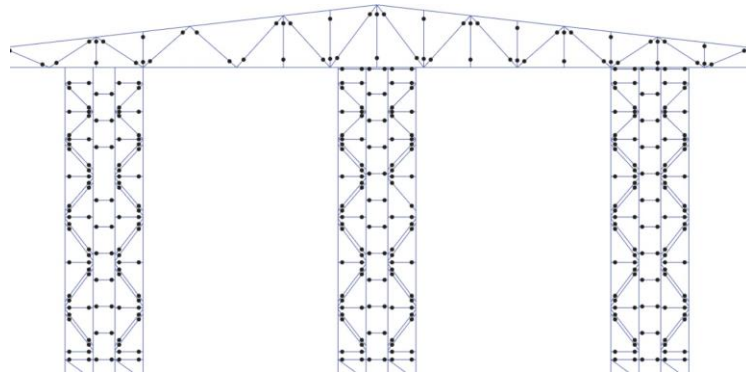


Figura 29. Costanera 2x8x1.8mm  
Fuente: Elaboración propia

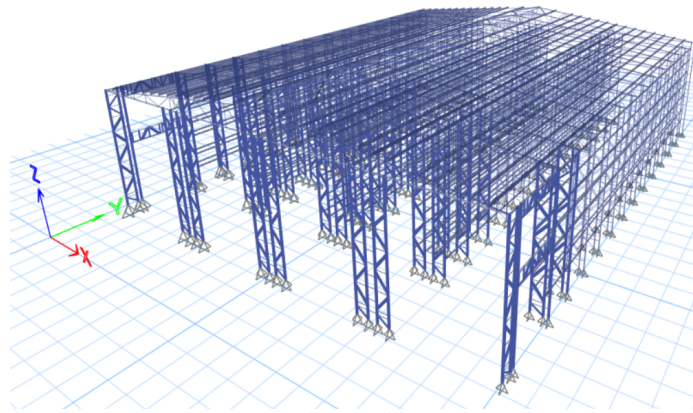


Figura 30. Modelo bodega autoportante

Fuente: Elaboración propia

### G. Asignación de cargas y espectro sísmico

Primero se clasificó la estructura según su sistema de resistencia lateral; en el caso de X, se clasificó como Sistema de Riostras Concéntricas de Baja Ductilidad, ya que posee diagonales unidos que forman triángulos entre los largueros y los puntales. Además, se considera de baja ductilidad puesto que el sistema debe alcanzar la carga axial máxima para poder deformarse significativamente, por lo que puede absorber grandes deformaciones sin experimentar fallas graves. Por el otro lado, el eje Y se clasificó como Marcos Ordinarios a Momento, ya que se compone principalmente por largueros y puntales, los cuales fueron diseñados para resistir cargas laterales, con el objetivo de que permitan la transmisión de momentos flexionales. La NSE 7.5, proporciona los siguientes coeficientes para el cálculo de la cortante basal:

| Datos Sistema Estructural   |      |          |      |         |
|-----------------------------|------|----------|------|---------|
| Sistema                     | R    | $\Omega$ | Cd   | $\beta$ |
| Riostras Concéntricas BD    | 3.25 | 2.00     | 3.25 | 1.00    |
| Marcos Ordinarios a Momento | 3.50 | 3.00     | 3.00 | 1.00    |

Cuadro 9

Sistema estructural NSE 7.5

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

Previo a definir las combinaciones de carga, se calibró el sismo en conformidad con la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala No. 7.5. Para ello, se corrió un análisis modal y se creó un análisis de espectro de respuesta para obtener el período en dirección X ( $T_x$ ) que fue 0.661s mientras que en Y ( $T_y$ ) fue igual a 0.524s.

Antes de emplear los parámetros del Cuadro 9, se dimensionó el período fundamental a través de la fórmula proporcionada en la NSE2-18, relacionando el coeficiente K del sistema estructural por eje con x, además de la altura de la bodega en metros, para la cual se consideró 12 m. Esto, con el objetivo de obtener el período fundamental para ambos

ejes. Obteniendo así,  $T_x=0.442$  s y  $T_y=0.736$  s, los cuales fueron empleados junto para la obtención de la pseudoaceleración en base al espectro sísmico generado por la ubicación y el tipo de obra dentro del cual se clasifica la estructura.

Otro aspecto fundamental a considerar es el peso de la estructura, siendo el peso de la estructura de 335.00 tonf; además de las masas adicionales de las unidades de carga. Posteriormente, se seleccionó el período máximo entre los brindados por ETABS 20 según los cocientes de masa participativa modal. Para x, predominó el período de ETABS 20, el cual asciende a 0.661s y el de período de Y mayor fue proporcionado por el código AGIES NSE2-18, siendo este 0.736s.

Después, se obtuvieron las pseudoaceleraciones en x y y en conformidad con el espectro sísmico de la estructura, iguales a  $1.13 \text{ m/s}^2$  y  $1.02 \text{ m/s}^2$  respectivamente para obtener el cortante basal de diseño en x y y. A dicho resultado, se le hace una calibración de diseño del 0.85 al ser una estructura que no cuenta con irregularidades para obtener el factor de calibración de cortantes estáticos, el cual se debe aplicar sobre la carga de sismo en x y y para obtener precisión en los resultados y facilitar la comparación de datos. Para ello, se realiza la corrida inicial para obtener, a través de los sismos de referencia, el cortante a calibrar proporcionado por el *software*. El factor de calibración se calculó de la siguiente forma:

**Ecuación No.14.** Factor de calibración

$$F_c = \frac{V_{dx}}{V_{ex}}$$

En donde:

- $V_{dx}$ : cortante de diseño
- $V_{ex}$ : cortante ETABS20
- $F_c$ : factor de calibración

Obteniendo de esta forma un factor de 3.80 y 2.89 para x y y respectivamente. El mismo, se ingresó al programa para obtener el sismo de diseño y experimental sin variación considerable. Se obtuvieron los siguientes resultados:

|    | Análisis dinámico SIN calibración (tonf) | Diseño AGIES (tonf) | Calibrado (tonf) |
|----|--|---------------------|------------------|
| Vx | 79.20                                    | 99.74               | 99.77            |
| Vy | 80.61                                    | 83.19               | 83.22            |

Cuadro 10

*Cortante basal bodega autoportante*

Fuente: *Elaboración propia*

Para efectos del caso 2, se corrió nuevamente un análisis modal en orden de obtener la cortante basal de diseño para la dirección X y Y. Obteniendo de esta forma  $T_x=0.711$  s y  $T_y=0.561$  s, para seleccionar el mínimo entre el proporcionado por ETABS 20 y el período fundamental obtenido, en dónde se relacionó la clasificación del sistema estructural

con la altura de la estructura, seleccionando así para la obtención de la pseudoaceleración  $T_x=0.711$  s y  $T_y=0.736$ .

Al modificar la posición de la masa adicional correspondiente a las unidades de carga, se determinó que el cortante de diseño en dirección X fue  $V_x=92.44$  tonf, mientras que para la dirección Y fue de  $V_y=82.94$  tonf. Posteriormente, se obtuvo el factor de calibración, en conformidad con la ecuación No.14, siendo este de 5.9 y 4.58 para x y y respectivamente. Lo anterior, con el objetivo de calibrar el sismo experimental en orden de obtener resultados más precisos. Se obtuvieron los siguientes resultados:

|           | Análisis dinámico SIN calibración (tonf) | Diseño AGIES (tonf) | Calibrado (tonf) |
|-----------|--|---------------------|------------------|
| <b>Vx</b> | 53.78                                    | 92.45               | 92.48            |
| <b>Vy</b> | 50.70                                    | 82.94               | 82.97            |

Cuadro 11

*Cortante basal bodega autoportante caso 2*

Fuente: *Elaboración propia*

Por último, para las unidades de carga colocadas sobre los seis niveles del eje 13 al 17, se corrió el diseño en ETABS para obtener los períodos para el análisis modal en dirección x y y, siendo estos  $T_x=0.726$  s y  $T_y=0.613$  s. Los anteriores, se compararon con el periodo fundamental en ambas direcciones para determinar la cortante de diseño en conformidad con la normativa AGIES NSE 2-18, siendo esta de  $V_x= 77.60$  tonf y  $V_y= 71.08$  tonf.

En el caso 3, el factor de calibración fue de 8.08 y 5.36 para x y y respectivamente. El mismo, se empleó para ajustar y verificar la interpretación ante riesgos sísmicos de ETABS 20, ajustando la cortante basal de la siguiente forma:

|           | Análisis dinámico SIN calibración | Diseño AGIES | Calibrado |
|-----------|-----------------------------------|--------------|-----------|
| <b>Vx</b> | 28.96                             | 77.59        | 77.62     |
| <b>Vy</b> | 37.15                             | 71.08        | 71.11     |

Cuadro 12

*Cortante basal bodega autoportante caso 3*

Fuente: *Elaboración propia*

## H. Verificación de derivas

Se procedió a obtener las derivas laterales para verificar que la estructura cumpliera con la rigidez adecuada, asegurando que los desplazamientos no vulnerabilizaran la seguridad estructural. Para ello, se evaluó si los desplazamientos en X y Y se encontraban dentro del rango recomendado por la normativa. Dependiendo de la clasificación del sistema estructural por eje, se consideraron los siguientes parámetros:

| Parámetros de verificación de derivas |            |             |      |            |             |
|---------------------------------------|------------|-------------|------|------------|-------------|
| x                                     |            |             | y    |            |             |
| Cd                                    | $\Delta a$ | $\Delta cp$ | Cd   | $\Delta a$ | $\Delta cp$ |
| 3.25                                  | 0.025      | 0.00769     | 3.00 | 0.025      | 0.00833     |

Cuadro 13  
*Cortante basal bodega autoportante*  
Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

Los nodos empleados para la verificación de derivas para los 3 casos variantes en cuanto a la posición de la unidad de carga se ubicaron en la parte alta de cada columna, específicamente a 10 metros de altura. Se verificó que el cociente entre el desplazamiento del sismo de referencia en x y la altura fuera menor a 0.00769 en el caso de x, y 0.00833 en el caso del desplazamiento en y.

Para las derivas de viento, se asignó la deriva máxima por viento de  $\Delta = 0.004$  considerando un nivel de importancia ( $I_c$ ) igual a 1.0. La misma, se empleó para obtener el cociente entre  $\delta_{kx}$  o bien, el desplazamiento máximo en dirección x, y la deriva máxima de viento. En el caso de la dirección y, se obtuvo el desplazamiento máximo en y  $\delta_{ky}$  entre las combinaciones de viento para dividirlo dentro de la deriva máxima de viento.

Los anteriores, deben de ser menor a 1 para asegurar que la estructura no experimente oscilaciones excesivas, las cuales comprometan su estabilidad. Nuevamente, se emplearon los modos de la parte alta de cada columna, específicamente a 10 metros de altura. Se obtuvieron los siguientes resultados:

| Dirección de viento | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | C/NC |
|---------------------|--------|--------|--------|------|
| D/Cx                | 0.26   | 0.26   | 0.71   | C    |
| D/Cy                | 1.77   | 1.77   | 1.77   | NC   |

Cuadro 14  
*Verificación de derivas de viento caso 1,2,3*  
Fuente: Elaboración propia

## I. Combinaciones de carga

Para efectos del análisis dinámico, se procedió a definir las combinaciones de carga estipuladas en la NSE 2-18 emitida por AGIES. Para ello, se empleó la opción en ETABS 20. Se añadieron 15 combinaciones de carga mencionadas en el marco teórico con el objetivo de garantizar que la estructura soporte las diferentes condiciones de carga y poder de esta manera, asegurarse que las personas dentro de las instalaciones se encuentren seguras.

Se contempló la componente vertical de diseño en las combinaciones en las que interviene el sismo tanto en x como en y. Para ello, se empleó la ecuación 4.5.9-1 de la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala 2-18. La componente vertical fue igual a 0.24 g.

## J. Capacidad de sistemas estructurales

Al obtener la resistencia a flexión y la compresión de las vigas, columnas y arriostriamientos por medio del programa informático, se procedió a tabular la información para su posterior verificación.

Además, se generó el chequeo tanto de columnas en conformidad con la norma AISC 360-22 Capítulo E y F, la cual indica que para secciones de canal se deben realizar comprobaciones de pandeo flexionante de miembros sin elementos esbeltos, pandeo torsional y flexo-torsión de ángulos y miembros sin elementos esbeltos, las cuales en este caso son las columnas y diagonales. Por otro lado, se examinó la factibilidad de revisar las vigas en flexión, pandeo local y pandeo torsional lateral. Lo anterior, con el objetivo de evaluar si la capacidad de la viga.

## K. Volteo

Durante la octava fase se obtuvo la distribución vertical de las fuerzas sísmicas en orden de analizar si la estructura según la distribución de las unidades de carga, está expuesta a volteo. Para ello, se realizó una sumatoria del peso por nivel por su respectiva altura en orden de obtener el total a dividir para obtener  $C_{xy}$ , siguiendo la siguiente fórmula especificada por la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala 7.5:

### Ecuación No.15. Cortante de cedencia

$$F_x = C_{yx} V_B$$
$$C_{xy} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (w_i h_i^k)}$$

En donde:

$F_x$ : es el cortante de cedencia en el nivel "x" de la edificación

$h_x$ : es la altura del nivel "x" sobre la base sísmica

k:  $0.75+0.5T_s$ , para  $0.5 < T < 2.5$  segundos

Al obtener la cortante de cedencia por nivel, se prosiguió obteniendo el momento (OTM) en cada nivel para poder obtener el factor de seguridad al relacionar el momento de volteo resistente del momento de volteo según las solicitaciones de carga y verificar si es mayor a 1.5 para evaluar si está expuesto a volteo tanto el caso 1 como el 2.

## L. Torsión

Se evaluó si la estructura se encuentra expuesta a la torsión para los casos 1, 2, 3. Para ello, se obtuvieron las derivas de las esquinas en el eje x y y, tal y como es evidenciado en la Figura No.31 a y b. Luego, se obtuvo un promedio con las derivas obtenidas por caso para poder dividirlo con la deriva máxima tanto en dirección x como en y. Si el cociente es mayor a 1.2, la estructura está expuesta a torsión, mientras que al ser superior a 1.5 se trataría de un caso de torsión extrema.

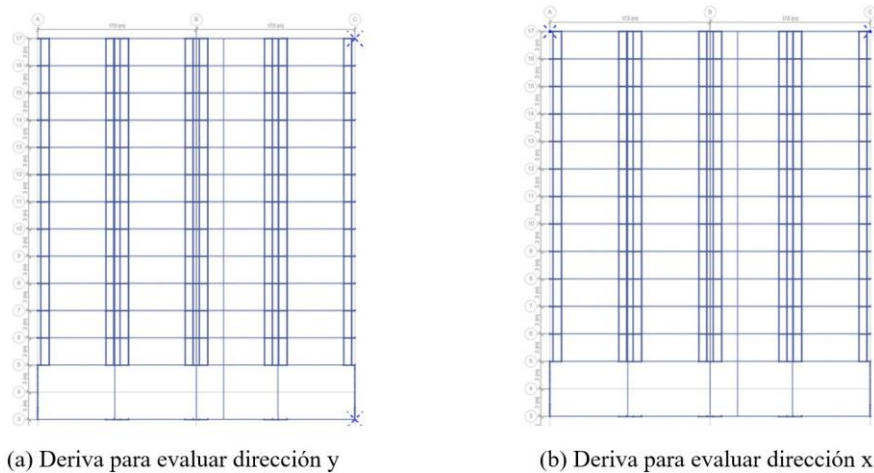


Figura 31. Derivas para evaluación de torsión

Fuente: Elaboración propia

## M. Interpretación de resultados

Durante la novena fase se identificarán los parámetros cuantitativos que permiten determinar la viabilidad técnica de la bodega autoportante. Al obtenerlos, se busca presentar la tabulación tanto de dicha bodega como de la nave industrial convencional para precisar su viabilidad estructural con base al cumplimiento de los requisitos mínimos de diseño. Esto, a través del desarrollo del análisis estructural brindado por ETABS 20 para ambos tipos de estructuras, considerando los coeficientes de mayoración y el diseño propuesto por el *software*.

Considerando que el peso es un factor circunstancial en la fabricación del acero, se obtendrá información de la estructura desde el programa computacional con el objetivo de conocer el peso implicado por cada una de las estructuras. De este modo, se podrá estimar el costo del material, y comparar desde un punto de vista económico qué tipo de estructura es más rentable. Para ello se contemplará una nave industrial tradicional con estanterías, en orden de obtener un costo más preciso y homogéneo según las implicaciones de la nave autoportante, lo cual genera que la comparación sea más efectiva.

## N. Entregables

En orden de realizar un análisis comparativo estructural de ambas tipologías para determinar si la bodega autoportante es estructural y logísticamente viable y competitiva, se entregará lo siguiente:

**1. Presupuesto.** Se realizará un registro del monto devengado para realizar ambos tipos de bodegas. Cabe mencionar que dicho registro, no incluirá el costo de mano de obra, transporte y movimiento de tierras. Únicamente contemplará los elementos de la estructura metálica, la cantidad, el precio unitario y el importe total.

| NAVE INDUSTRIAL  |               |              |                       |
|--|---------------|--------------|-----------------------|
| Descripción  | Cantidad (kg) | Precio (kg)  | Total (Q)             |
| Equipo y mano de obra                                  |               |              |                       |
| Fabricación, transporte y montajes                     |               |              |                       |
| Equipo oxicorte, electrodo, discos de corte y de pulir |               |              |                       |
| Pintura anticorrosiva                                  | 69090         | Q 9.48       | Q 654,958.00          |
| Sistema de almacenamiento tipo Rack Selectivo          | 8             | Q 130,500.00 | Q 1,044,000.00        |
|  |               |              | <u>Q 1,698,958.00</u> |

Cuadro 15

*Integración precio Nave Industrial*

Fuente: *Elaboración propia*

| BODEGA AUTOPORTANTE                                    |               |             |                |
|--|---------------|-------------|----------------|
| Descripción  | Cantidad (kg) | Precio (kg) | Total (Q)      |
| Equipo y mano de obra                                  |               |             |                |
| Fabricación, transporte y montajes                     |               |             |                |
| Equipo oxicorte, electrodo, discos de corte y de pulir |               |             |                |
| Pintura anticorrosiva                                  | 335000        | Q 9.48      | Q 3,175,726.30 |

Cuadro 16

*Integración precio Bodega Autoportante*

Fuente: *Elaboración propia*

a. **Análisis costo-beneficio.** Se realizará un análisis de costo-beneficio que permitirá visibilizar las fortalezas y debilidades de las alternativas de almacenamiento. Para ello, se tomará en cuenta lo siguiente:

- **Formulación objetiva:** se establecerán qué es lo que se busca determinar a través del análisis costo-beneficio. En este caso, se desea determinar qué tipología es más eficiente en relación a las solicitudes de carga y el costo de la estructura.
- **Determinar los requerimientos y limitaciones de las tipologías:** esto, con base en su capacidad de almacenaje, altura y sistematización. Por otro lado, para comparar su rentabilidad, se analizarán los precios obtenidos según el peso de la estructura para identificar los beneficios relacionados con cada opción.

|                          | ANÁLISIS COMPARATIVO   |  |
|--------------------------|--|--|
|                          | Nave industrial  | Bodega autoportante  |
| <b>Construcción</b>      | Costo de mano obra elevado al ser independiente la estructura del sistema de almacenamiento  | Cimentación menos extensa debido a su flexibilidad   |
|                          | Precio más económico que las bodegas autoportantes porque requieren de una estructura menos robusta                                | Reducción de columnas y vigas adicionales para la optimización del espacio   |
| <b>Mantenimiento</b>     | Cimentación y soporte de la estructura más robusta   | La construcción de este tipo de estructura requiere mayor cantidad de acero y materiales especializados                                      |
|                          | Costos operativos y de mantenimiento más elevados debido al desgaste independiente de la estructura y el sistema de almacenamiento | Al integrar la estructura y el sistema de almacenamiento con materiales de alta calidad, se reducen los costos operativos y de mantenimiento |
|                          | Posible reconfiguración  | Menos necesidad de remplazo de partes estructurales  |
| <b>Terreno</b>           | Maximización del espacio horizontal  | Maximización del espacio vertical  |
|                          | Flexibilidad para distribuir el espacio  | Reconfiguración del espacio limitada   |
| <b>Tiempo</b>            | Mayor tiempo de construcción debido a acabados y mano de obra  | Menor tiempo de instalación por la integración de estanterías y sistema estructural  |
| <b>Durabilidad</b>       | Menor resistencia a condiciones climáticas adversas y terremotos.  | Mayor resistencia a condiciones climáticas adversas y terremotos.  |
| <b>Ahorro energético</b> | Pueden requerir más energía debido a su tamaño y las operaciones que se llevan a cabo en ellas                                     | Más eficiente energéticamente a causa de un mejor aislamiento térmico  |

Cuadro 17  
*Costos nave industrial vs bodega autoportante*

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior, justifica que una nave autoportante posee un costo inicial más elevado a comparación de una nave industrial convencional. Sin embargo, a largo plazo el costo de mantenimiento que requiere cada una, hace a la bodega autoportante más atractiva. Además que los costos de mano de obra para la bodega autoportante se reducen puesto que la estructura está constituida por sistemas modulares o prefabricados que resultan en un menor tiempo de obra. Sin mencionar, que no requiere de soportes adicionales por lo que el tiempo de instalación es menos compleja.

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizó la viabilidad estructural de una bodega autoportante ubicada en el municipio de la Ciudad de Guatemala según las normativas vigentes locales. Para ello, se modelaron los perfiles en conformidad con el *Manual Básico de Formación para Rack Selectivo-México*. Sin embargo, en el caso de las columnas denominadas puntales, se decidió desprestigiar los orificios de las mismas considerando que el tamaño de los agujeros es relativamente pequeño siendo el 0.0482 % del área transversal total, por lo que la reducción del área efectiva no es significativa para la verificación a realizar. Otro aspecto que se consideró al modelar la estructura fue el momento de inercia de los perfiles, puesto que el programa informático no es compatible con los formatos .dxf o .ifc para la importación de perfiles, por lo que se optó por emplear la opción de *Section Designer* para crear un nuevo perfil, permitiendo así trazar un punto de referencia que permitieran crear el perfil, y verificar dicho trazo a través de la variación de la inercia. En este caso, se consideró aceptable una diferencia del 5.64 % de la inercia, obteniendo un valor de 0.000097 m<sup>4</sup>.

Posteriormente, se ingresaron las solicitaciones de carga según lo mencionado en la sección de metodología; para verificar las derivas de viento, se comprobó que el área designada para el paso de montacargas y de ingreso de mercadería presenta una zona de alta flexibilidad. Esto, es evidente al analizar las derivas de viento en dirección Y principalmente, en donde se obtuvo el cociente  $\Delta_y/H_o$  de 10.65 en donde  $\Delta_y$  hace referencia al 75 % mayor desplazamiento en dirección Y y  $H_o$  a la altura de la bodega autoportante. Esto representa desplazamientos laterales significativamente pronunciados, los cuales pueden aumentar la probabilidad de colapso.

### Cálculo No.1 Deriva de viento en y

Deriva en sentido y:

$$\Delta_y := \frac{\delta_{wk,y}}{h_o} = 0.043$$

$$DC_y := \frac{\Delta_y}{\Delta} = 10.656$$

Para verificar la ubicación del elemento estructural que afectaba el cumplimiento de derivas en dirección Y, se optó por visualizar la deformación ante la combinación crítica CR6 en conformidad con la NSE2-2018, tal y como se observa la Figura No.31. Se puede observar cómo la estructura se desplaza lateralmente de forma perceptible en el espacio destinado para carga y descarga. Por lo que se recomienda considerar las siguientes soluciones:

Incrementar el espesor de las secciones de las columnas aumentando el espesor de las mismas de 1.8mm a 2.67mm para cumplir con las capacidades de carga requeridas. Como también, colocar diagonales entre los bastidores para aumentar la rigidez lateral de las columnas, redistribuyendo las fuerzas de la estructura para evitar pandeo en columnas esbeltas. Además de reformular el diseño de la estructura, colocando un puntal adicional con arriostramiento en el área de carga y descarga para distribuir las cargas y mejorar el comportamiento de la estructura. Otra recomendación, es disminuir la luz libre de los lar-

gueros colocando un bastidor cada 1.5m en vez de a cada 3m para incrementar la rigidez global del sistema estructural. Incluso, soportar las columnas a media altura para aumentar la resistencia ante cargas laterales y reducir la longitud efectiva no soportada.

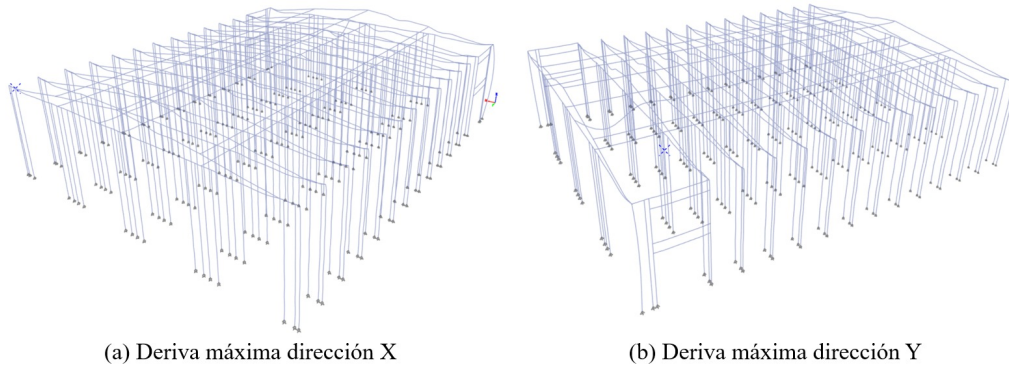
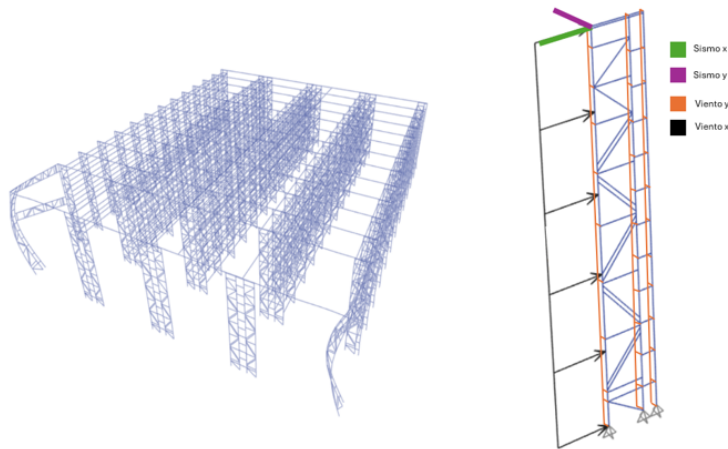


Figura 32. Deformación combinación CR6

Fuente: Elaboración propia

También, se evaluaron las derivas bajo la acción de sismo, comparando la deriva máxima permitida en el nivel de piso ( $\Delta_{cp}$ ), la cual varía por el sistema de resistencia lateral empleado en dirección X y Y, siendo 0.007692 y 0.008333 respectivamente. Dichas derivas máximas se ubican, en conformidad con la figura No.31a, al extremo superior del primer bastidor de izquierda a derecha para el sismo de referencia en X, mientras que en la dirección Y, tal y como lo indica la figura No.31a, se ubica entre el área de carga y descarga en el segundo bastidor de derecha a izquierda para el sismo de referencia en Y. Dicho parámetro se comparó con 16,868 derivas emitidas por el caso de carga X y Y. Siendo la mayor deriva en X ( $U_x$ ) de 0.006142, y en dirección Y ( $U_y$ ) de 0.007564 siendo ambos menores a la deriva máxima permitida. Por lo que la bodega autoportante no posee deformaciones excesivas, haciendo referencia que en casos de fuerzas sísmicas, la estructura es capaz de resistir sin experimentar daños significativos.



(a) Deformación combinación CR6

(b) Diagrama de aplicación de cargas

Figura 33. Deformación combinación CR6

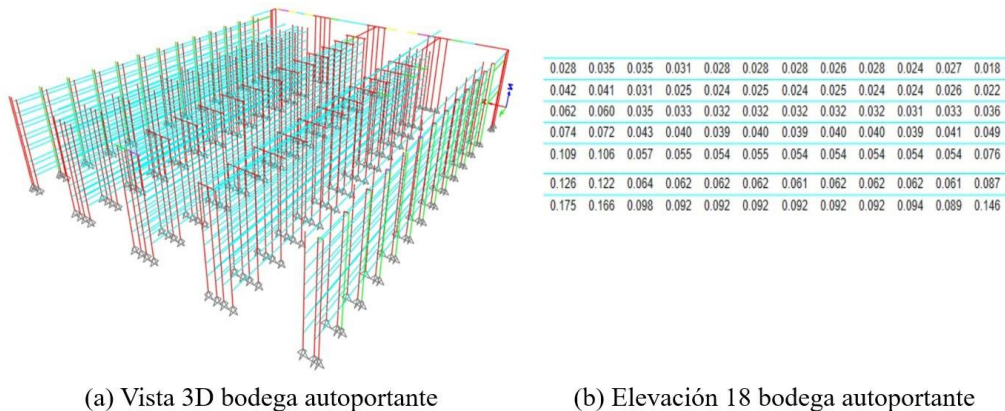
Fuente: Elaboración propia



justo en la entrada de la bodega como se puede observar en la Figura No. 36. Las columnas de los extremos, o puntales en este caso, presentan la razón de demanda-capacidad más elevada considerando que están expuestas tanto a viento en dirección X como en Y, lo cual representa un riesgo de colapso ante sismos con intensidades similares al sismo de diseño. Esto, considerando que dichas columnas pueden llegar a su capacidad de carga máxima previo al resto. En este caso, los puntales de los extremos fallaron al presentar una relación  $kl/r \geq 200$ , lo cual hace referencia a que la relación de esbeltez supera 200, por lo que probablemente ante cargas axiales el puntal tenderá a pandearse.

También, se verificó la capacidad de las diagonales, las cuales reducen el largo efectivo de las columnas por  $1/8$ . Las mismas, al igual que las vigas, presentan una razón menor a 1.0, por lo que son capaces de soportar las solicitaciones. Esto requiere un máximo de 55 % de la capacidad de las diagonales tal y como se puede observar en la figura 37b. Por lo que se podría optimizar.

Cabe mencionar, que el colocar doble arriostramiento en algunos segmentos del bastidor, permite aumentar la rigidez del sistema estructural global, además de que, al estar expuesto ante solicitaciones de sismo y viento, las riostras o diagonales en este caso permiten la transferencia de esfuerzos de forma más efectiva. Esto, considerando que al comparar las columnas con doble arriostramiento con las que únicamente tenían uno, las últimas no tienen la capacidad de soportar la carga axial puesto que es mayor que la capacidad de carga axial de la columna. Por lo que mantener arriostrado únicamente en un sentido como las columnas del área y descarga que carecen de vigas que contribuyen a la rigidez global, puede comprometer la estabilidad estructural.



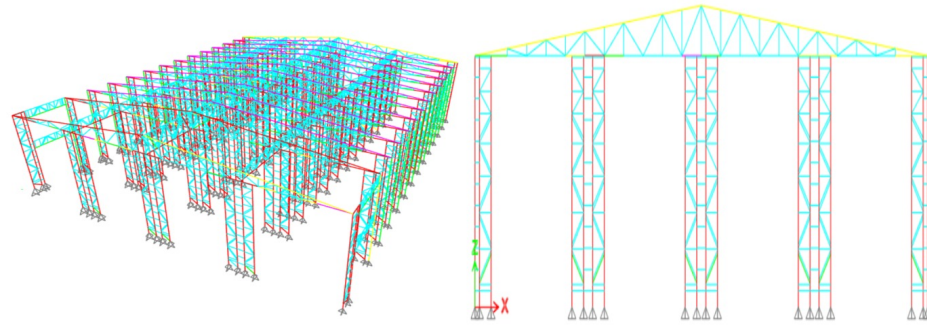
(a) Vista 3D bodega autoportante

(b) Elevación 18 bodega autoportante

Figura 35. Chequeo de diseño dinámico de vigas

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los largueros de las estanterías, se demostró que aún con la bodega al máximo de su capacidad todas las vigas presentan una razón de demanda-capacidad menor a 1.0 para todas las combinaciones de carga. En este caso, las mismas se encuentran sobredimensionadas puesto que la razón máxima de las vigas es de 0.12. Esto indica que la sección puede ser optimizada considerablemente.



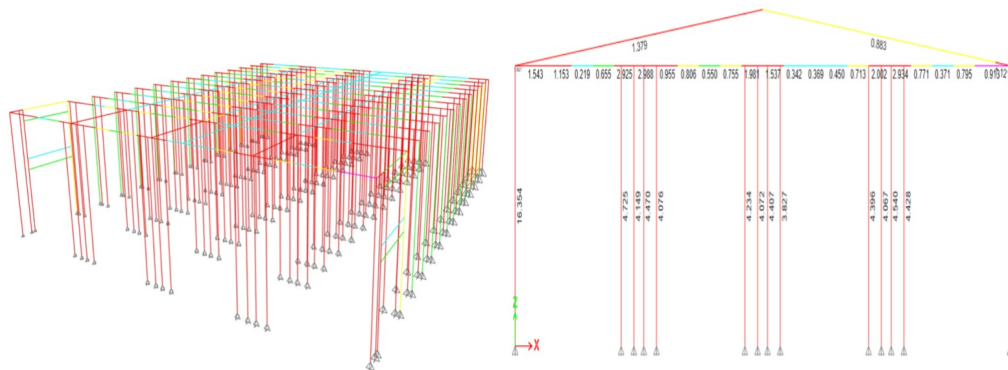
(a) Vista 3D bodega autoportante

(b) Elevación 3 bodega autoportante

Figura 36. Chequeo de diseño dinámico de diagonales

Fuente: Elaboración propia

En el caso 2, caracterizado por ubicar las tarimas únicamente en los niveles del 3 al 6 de las estanterías, se observó que el eliminar la masa sísmica de la unidad de carga de los primeros tres niveles eleva la demanda de las columnas debido al aumento de carga axial, el cual afecta directamente la razón de demanda-capacidad de los elementos estructurales. Esto, influye directamente en la capacidad de las columnas para resistir las fuerzas. Pruebas de ello, es el aumento entre la razón de demanda/capacidad en un 12.45 % debido a un aumento en la relación de la fuerza axial de compresión requerida con la fuerza axial de diseño, además del momento mayor del elemento.



(a) Vista 3D bodega autoportante caso 2

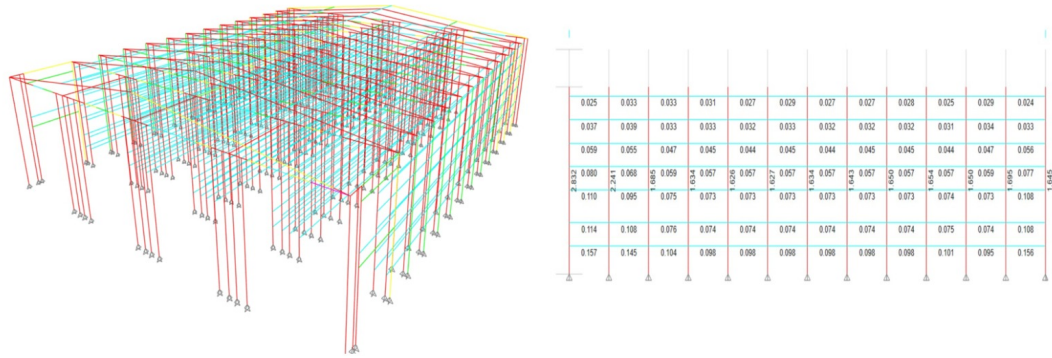
(b) Elevación 3 bodega autoportante caso 2

Figura 37. Chequeo de diseño dinámico de columnas

Fuente: Elaboración propia

También, se puede observar cómo la demanda-capacidad del perfil U122 empleado para conformar la estructura del techo se mantuvo constante en comparación con el caso 1 tanto para el caso 2 como el 3. Esto, confirma que la influencia de las cargas al no estar directamente conectadas al techo, son mínimas. Por lo que no provoca un efecto significativo en el desempeño estructural del mismo. Aun así, se reitera que los momentos adyacentes funcionan como puntos de apoyo entre el techo y el cuerpo de la estructura, lo que genera que absorban mayor momento generado por las cargas dinámicas en dirección x y y, lo cual

aumenta el radio de demanda capacidad.



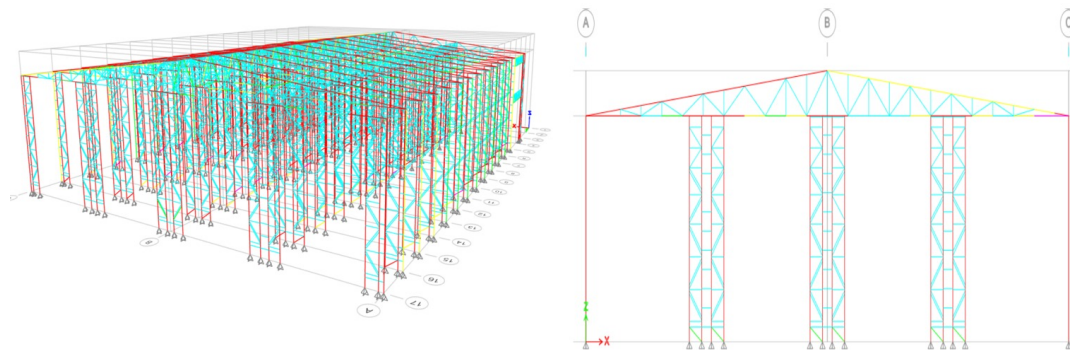
(a) Vista 3D bodega autoportante caso 2

(b) Elevación 18 bodega autoportante caso 2

Figura 38. Chequeo de diseño dinámico de vigas

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, al no contar con masas sísmicas en los niveles inferiores, se redujo la demanda-capacidad significativamente en los casos más críticos en un 14.48 % siendo este el nodo en el primer nivel en la segunda columna de izquierda a derecha, tal y como se puede observar en la elevación de la Figura 36b comparada con la 37b. Aun así, las vigas se encuentran sobredimensionadas puesto que no superan una razón mayor a 0.7, manteniéndose menor a 1.0.



(a) Vista 3D bodega autoportante caso 2

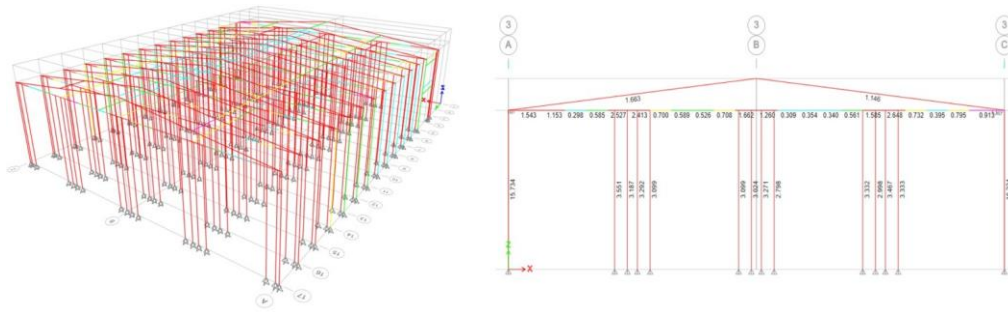
(b) Elevación 3 bodega autoportante caso 2

Figura 39. Chequeo de diseño dinámico de diagonales

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al caso 3, se observó una disminución en la relación demanda-capacidad en comparación con el caso 2 en un 4.71 % a la columna más crítica ubicada en el eje 3 en el extremo derecho en conformidad con la Figura No.38b. Sin embargo, al contrastarlo con el caso 1, presentó una menor capacidad para soportar las solicitudes de carga dinámica, específicamente en un 6.68 %. Esto, significa que el colocar las unidades de carga únicamente en las últimas cuatro posiciones de los seis niveles de forma distribuida evita

el riesgo de volteo en casos de vientos fuertes o sismos.



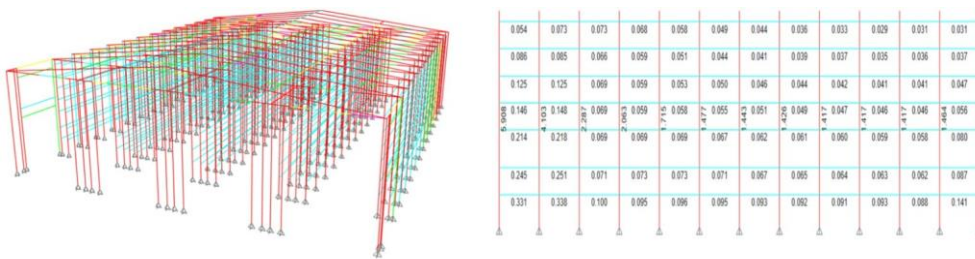
(a) Vista 3D bodega autoportante caso 3

(b) Elevación 3 bodega autoportante caso 3

Figura 40. Chequeo de diseño dinámico de columnas

Fuente: Elaboración propia

En relación al tubo cuadrado 150x50mm empleado para las vigas, se observó que al cambiar la distribución de las unidades de carga para el caso 3 la relación de demanda-capacidad aumentó aproximadamente el doble en la mayoría de casos, sobretodo en las posiciones ubicadas del eje 13 al 17, justo en donde se colocó la masa adicional, siendo incluso más críticas el radio de demanda-capacidad que en el caso 2. Esto, causado por el cambio del centro de masa de la estructura, el cual genera un incremento en las fuerzas internas. Aún así, las vigas están sobredimensionadas, puesto que la viga más crítica en el eje 18 está trabajando al 33.8 % de su capacidad.



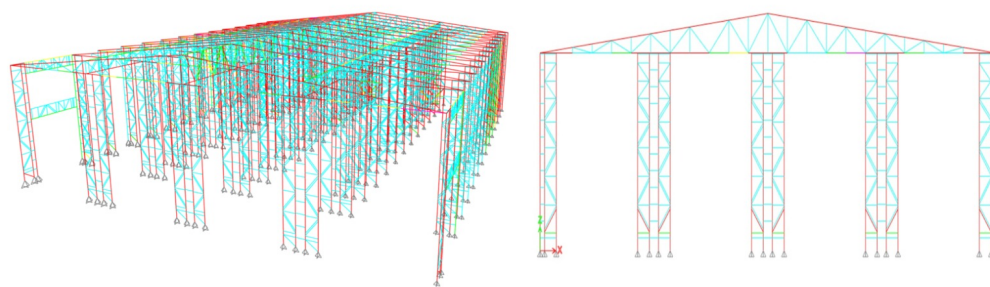
(a) Vista 3D bodega autoportante caso 3

(b) Elevación 18 bodega autoportante caso 3

Figura 41. Chequeo de diseño dinámico de vigas

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en los primeros dos casos, se observó que las diagonales de la bodega autoportante mantiene su radio de demanda-capacidad por debajo de 1.0 con excepción de las diagonales en el último nivel específicamente del eje 17, justo en donde se distribuyó la masa adicional como se puede ver en la Figura 42b.



(a) Vista 3D bodega autoportante caso 3

(b) Elevación 3 bodega autoportante caso 3

Figura 42. Chequeo de diseño dinámico de diagonales

Fuente: Elaboración propia

Para ampliar el panorama estructural, se optó por el aumento de la carga concentrada en los niveles superiores se evaluaron los elementos por pandeo por flexión, torsión y flexo-torsión en conformidad con el reglamento AISC 360-16.

Tal y como se puede observar en el Cuadro 18, la distribución de tarimas dentro de los espacios designados del sistema de almacenamiento, específicamente al colocarlas en todos los niveles de las últimas cuatro posiciones, genera torsión la cual provoca concentraciones de esfuerzos que pueden comprometer la integridad de la estructura. Esto, es evidente puesto que el momento de la columna más crítica es 5.54 veces la capacidad resistente del elemento, a comparación del caso 1 que al no desplazar el centro de gravedad mantiene una diferencia de 2.51.

|            | CASO 1 | CASO 2 | CASO 3 |
|------------|--------|--------|--------|
| Mu (kN-m)  | 3.88   | 3.51   | 8.56   |
| Mn (kN-m)  | 1.54   | 1.54   | 1.54   |
| NC (Mu/Mn) | 2.51   | 2.28   | 5.54   |

Cuadro 18

Comparación momento último

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

Además, se evidenció que una bodega al máximo de su capacidad tiene menor riesgo de volteo que una funcionando al 50 % de capacidad. Lo anterior, está relacionado con el peso de las unidades de carga y su distribución, puesto que el caso 2 con 170.58 tonf, a comparación del caso 1 con 341.16 tonf, genera fuerzas más intensas en los elementos estructurales más cercanas a la capacidad resistente de la estructura. En otras palabras, el caso 1 presentó una capacidad mayor para resistir el riesgo de volteo en comparación con las demandas que se le imponen, puesto que presenta mayores factores de seguridad, lo cual se comprueba a través del factor de seguridad de 4.47 y 6.00 para la dirección x y y respectivamente. Los anteriores, al ser más grandes que los factores de seguridad en x y en y del caso 2, en conformidad con el Cuadro No. 19, indican que la bodega al máximo de su

capacidad puede soportar cargas mayores de lo esperado antes de fallar. Aún así, ninguno de los dos casos está expuesto a fallar por volteo.

| CASO | Mv (tonf-m) |        | Mr (tonf-m) |         | Fs   |      |
|------|-------------|--------|-------------|---------|------|------|
|      | x           | y      | x           | y       | x    | y    |
| 1    | 593.56      | 605.76 | 5373.27     | 7369.06 | 4.47 | 6.00 |
| 2    | 798.30      | 716.21 | 2686.64     | 3684.53 | 3.16 | 3.22 |

Cuadro 19

*Comparación momento último*

Fuente: AGIES NSE 2-18, 2018

En cuanto a la torsión, se comprobó que el caso 3 no está expuesto a riesgo por torsión, mientras que las fuerzas aplicadas en el caso 1 y 2 causan torsión en los elementos estructurales en la dirección x. Esto, al poseer una relación entre la deriva máxima y el promedio de las derivas mayor a 1.2, tal y como se puede observar en el Cuadro 19. En este caso, el caso 2 presenta mayor riesgo de torsión puesto que a comparación del caso 1, el colocar las tarimas únicamente entre los niveles del 3 al 6, eleva el centro de gravedad de la estructura lo cual aumenta significativamente la inestabilidad. Además, puede llevar a tensiones excesivas en las partes inferiores de la estantería, afectando su integridad. A pesar de que se anticipaba más torsión en el caso 3 debido a la concentración de masa en un extremo, los efectos torsionales fueron menores al resto de los casos.

| CASO | Relación torsión |      |
|------|------------------|------|
|      | x                | y    |
| 1    | 1.31             | 1.00 |
| 2    | 1.35             | 1.02 |
| 3    | 1.03             | 1.02 |

Cuadro 20

*Comparación momento último*

AGIES NSE 2-18, 2018

## VIII. CONCLUSIONES

Se analizó la viabilidad estructural y económica del diseño de una bodega autoportante comparada con una nave industrial convencional ambas ubicadas en la Ciudad de Guatemala y por ende, con el mismo tipo de suelo por lo que comparten el mismo espectro sísmico. Se empleó la NSE2-2018, NSE3-2018 y AISC 30-22 para la verificación del diseño propuesto para una bodega autoportante. Sin mencionar que se empleó la ASTM A1011 como referencia para extraer las propiedades de los materiales. Se concluyó que la nave industrial convencional demostró un mejor comportamiento a comparación de la bodega autoportante. Esto es evidente considerando que las columnas de la bodega autoportante poseen en su mayoría una razón demanda-capacidad mayor a 1.0.

Aún cuando la bodega autoportante posee un menor costo de mantenimiento, menor cantidad de hormigón y cimentación, al igual que elimina el costo del sistema de almacenamiento debido a la integración estructural, la nave industrial presentó un precio más accesible aún contemplando la compra de un sistema de almacenamiento compuesto por ocho estanterías selectivas de seis niveles. El precio de la bodega autoportante de dimensiones 35x42 m es 1.86 veces el precio de la nave industrial, siendo estos igual a Q 3,175,726.30 y Q 1,698,958.00 respectivamente contemplando el peso del acero, mano de obra, montaje y equipo requerido. Aún así, el precio del sistema de almacenamiento representa el 61.44 %, por lo que las bodegas autoportantes si pueden ser una alternativa más económica pero depende del diseño propuesto. Sin mencionar que al emplear sistemas de almacenamiento automatizados se puede disminuir el ancho de los pasillos empleando dicho espacio para arriostrar de los dos lados las columnas y por ende, rigidizar el sistema.

Se determinó que el arriostramiento transversal a lo largo de la estructura disminuye el desplazamiento que se genera en la dirección X y Y. Esto, al comparar los radios de masa partícipe de ningún, un y tres arriostramientos, en donde el período aumentó hasta seis veces al no tener ninguna clase de refuerzo para estabilizar la estructura. Se comprobó que arriostrar el techo a través de tres armaduras limitó el desplazamiento horizontal del mismo, eliminando inconsistencias en el diseño.

También, se debe mencionar que las diagonales permiten distribuir los esfuerzos de forma más efectiva. Se comprobó al comparar el radio de demanda-capacidad de una columna con arriostramiento en ambas direcciones con la misma únicamente arriostrada en una dirección, que sin las vigas y diagonales disminuye la longitud efectiva en 1.25 m, generando un incremento en la fuerza axial a la que estaban sometidas, superando la capacidad de carga axial de la columna.

Se estableció que el caso 2, el cual funciona al 50 % de la capacidad de almacenamiento de la bodega, es el caso más crítico al presentar mayor riesgo de volteo con un factor de seguridad de 3.16 en dirección x y 3.22 en dirección y, además de presentar mayor riesgo a torsión con cociente entre la deriva máxima y el promedio de derivas en dirección x de 1.35. Aún cuando el centro de masa en el caso 3 está más alejado del centro de rigidez.

## IX. RECOMENDACIONES

- Es circunstancial para replicar este trabajo de graduación, revisar actualizaciones de las normas y guías de diseño para garantizar que se contemplaron las necesidades cambiantes del entorno.
- Paralelo al uso de programas computacionales, se recomienda emplear hojas de cálculo para identificar cualquier anomalía.
- Se recomienda evaluar el desempeño de la estructura incrementando las secciones de las columnas de 1.8mm a 2.67mm.
- Se recomienda evaluar el desempeño de la estructura disminuyendo la distancia entre columnas de 3m a 1.5m para verificar si incrementa la rigidez de la estructura, minimizando así deformaciones y vibraciones.
- Se recomienda para futuras investigaciones que si se desea buscar otra solución para aumentar las razones de demanda capacidad de los elementos estructurales, se puede emplear otra forma de columnas como cuadradas o bien, redondas.
- Por temas de alcance del trabajo de graduación, se realizó un análisis comparativo en términos de peso de ambas tipologías para evaluar su factibilidad, es recomendable integrar costos considerando la instalación de la lámina, tornillería, equipo y mano de obra calificada para un análisis más preciso.
- Con el fin de ampliar el alcance del trabajo de graduación, se sugiere analizar la estructura de una bodega autoportante con una altura mayor a 12 metros para evaluar su ventaja competitiva en comparación con las naves industriales convencionales.
- En caso se desee analizar una grúa puente como parte de la estructura, es importante que la grúa se ubique cerca de las áreas de carga y descarga para facilitar el manejo de materiales sin necesidad de desplazarlos a grandes distancias, y asegurar que las estructuras del techo puedan soportar el peso y el movimiento de la grúa sin comprometer la estabilidad de la bodega.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Specification for Structural Steel Buildings*. (2016).
- Andersson, J. (2021). *Análisis y diseño estructural de una nave industrial mediante métodos numéricos y simulaciones 3D* [Tesis de maestría, Universidad del Valle de Guatemala].
- Arilla, S. (2021). Bodega autoportante: ¿qué es y cuales son sus ventajas? <https://www.scmlogistica.es/almacen-autoportante-que-es-y-ventajas/>
- Arilla, S. (2022). Almacén autoportante: qué es y ventajas. <https://www.scmlogistica.es/almacen-autoportante-que-es-y-ventajas/>
- ARracking. (2021). Almacenes autoportantes. <https://www.ar-racking.com/es/sistemas-almacenaje/almacenes-automatizados/palets/autoportantes/>
- Baena, J. (2023). ¿Qué es la logística 4.0 y cómo la aplicamos a la empresa? <https://www.obsbusiness.school/blog/que-es-la-logistica-40-y-como-la-aplicamos-la-empresa>
- Capera, J. (2021). Importancia del almacenamiento en la cadena logística. <https://aldialogistica.com/importancia-del-almacenamiento-en-la-cadena-logistica/>
- CentralAmericaData. (2021). Parque Industrial en Guatemala por \$8 millones. [https://centralamericadata.com/es/article/main/Parque\\_Industrial\\_en\\_Guatemala\\_por\\_8\\_millones](https://centralamericadata.com/es/article/main/Parque_Industrial_en_Guatemala_por_8_millones)
- Specification for Structural Steel Buildings*. (2017).
- CSI Portugal. (2020). SAP 2000 (inf. téc.). American Institute of Steel Construction.
- EIGO Construcciones. (2018). Tipos de naves industriales. <https://eigoconstrucciones.com/noticia/tipos-de-naves-industriales/>
- El Troudi, H. (2022). El cemento y su enorme huella del carbono. <https://haimaneltrouidi.com/el-cemento-y-su-enorme-huella-de-carbono/>
- Gándara, N. (2019). Estas son las áreas que aún tienen potencial para el sector de bodegas en Guatemala. <https://www.prensalibre.com/economia/estas-son-las-20areas-que-aun-tienen-potencial-para-el-sector-de-bodegas-en-guatemala/s>
- González, F. (2020). Logística 4.0. <https://www.esic.edu/rethink/comercial-y-ventas/logistica-4-0-que-es-y-que-ventajas-tiene-su-uso-con-la-tecnologia>
- King, W. S., & Chen, W.-F. (1993). LRFD Analysis for Semi-Rigid Frame Design. *Engineering Journal*.
- Logycom. (2022). Importancia del almacenaje y distribución en logística. <https://www.logycom.mx/blog/importancia-almacenaje-distribucion-logistica>
- McCormac, J. (2013). *Diseño de estructuras de acero*. Alfaomega grupo editor.
- McCormac, J., & Csernak, S. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. Alpha Editorial.
- Mecalux. (2020). Exterior de las bodegas autoportantes. <https://www.mecalux.cl/manual-bodegaje/disenio-de-bodegas/exterior-bodega-autoportante>
- Mecalux. (2021). Partes de una estantería: más allá de bastidores y largueros. <https://www.mecalux.com.co/blog/partes-de-una-estanteria>
- Morales, J. (2023). 3 tipos de naves industriales, ¡elige la correcta de acuerdo a lo que necesitas! <https://aceroscrea.com/blog/3-tipos-de-naves-industriales-cual-debes-elegir/>
- Natali, A. (2020). *Advanced seismic design approach for Automated Rack Supported Warehouses* [Tesis doctoral, Universidad de Florencia].
- Peña, A. (2009). Naves industriales con acero.

- Periódico Digital Centroamericano y del Caribe -PDCC-. (2022). La construcción industrial continúa en auge por el crecimiento constante del e-commerce. <https://newsinamerica.com/pdcc/economia/2022/la-construccion-industrial-continua-en-auge-por-el-crecimiento-constante-del-e-commerce/>
- AGIES NSE 2-18 DEMANDAS ESTRUCTURALES, CONDICIONES DE SITIO Y NIVELES DE PROTECCIÓN.* (2018).
- Specification for Structural Steel Buildings.* (2016).
- Remisa. (2021). La importancia del almacenaje. [https://remisa.com/blog/detalle/36/La\\_importancia\\_del\\_Almacenaje](https://remisa.com/blog/detalle/36/La_importancia_del_Almacenaje)
- Vélez, E. (2020). ¿Qué es la logística de almacenamiento y cuál es su importancia en el sector industrial? <https://soliplast.com/soluciones/logistica-almacenamiento/>

## XI. APÉNDICES

### A. Propiedades de los materiales

**SSAB**

Data sheet ASTM A1011 HSLAS Grade 55 2017-04-19

## ASTM A1011 HSLAS Grade 55

### General Product Description

ASTM A1011 is a standard specification for hot-rolled, steel sheet and strip and coils of carbon steel, structural steel, high-strength low-alloy steel, high-strength low-alloy steel with improved formability, and ultra-high strength steel. The specification covers steel sheet, strip, and coils in thicknesses less than 0.230 in. A1011 High-Strength Low-Alloy Steel (HSLAS) Grade 55 has a specified minimum yield strength of 55 ksi.

### Available Dimensions

| Grade                  | Product type | Thickness (in) | Width (in)  |
|------------------------|--------------|----------------|-------------|
| HSLAS Grade 55 Class 1 | Coils        | 0.079 - 0.229  | 39.4 - 73.2 |

Inquire availability.

### Mechanical Properties

Tensile testing is performed in the longitudinal direction.

| Grade                  | Thickness (in) | Yield strength (min ksi) | Tensile strength (min ksi) | Elongation in 2" <sup>1)</sup> (min %) |
|------------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|--|
| HSLAS Grade 55 Class 1 | 0.079 - 0.229  | 55                       | 70                         | 20                                     |

<sup>1)</sup> For thicknesses from 0.097 in. down to 0.079, the minimum Elongation is 18%.

### Chemical Composition

(Heat analysis, wt. %)

| Grade                  | C (max %) | Mn (max %) | P (max %) | S (max %) | Ti <sup>1)</sup> (min %) | V <sup>1)</sup> (min %) | Cb <sup>1)</sup> (min %) | Ni (max %) | Mo (max %) | Cu <sup>2)</sup> (min %) | Cr (max %) |
|------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|
| HSLAS Grade 55 Class 1 | 0.25      | 1.35       | 0.04      | 0.04      | 0.005                    | 0.005                   | 0.005                    | 0.20       | 0.06       | 0.20                     | 0.15       |

<sup>1)</sup> One or more of Cb, V, and Ti may be added. When added the min for that element applies, if not added then there is no minimum requirement.

<sup>2)</sup> Copper steel with 0.20% minimum Cu.

### Contact Information

[www.ssab.com/contact](http://www.ssab.com/contact)

Figura 43. ASTM A1011 HSLAS Grade 55

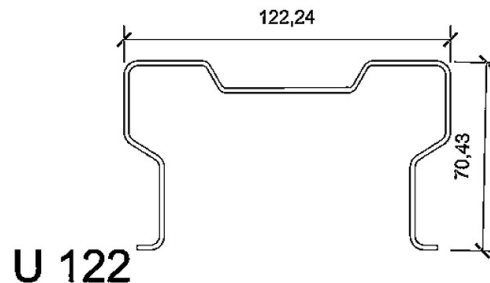


Figura 44. Perfil U122

## ASTM A1011 HSLAS Grade 50

### General Product Description

ASTM A1011 is a standard specification for hot-rolled, steel sheet and strip and coils of carbon steel, structural steel, high-strength low-alloy steel, high-strength low-alloy steel with improved formability, and ultra-high strength steel. The specification covers steel sheet, strip, and coils in thicknesses less than 0.230 in. A1011 High-Strength Low-Alloy Steel with Improved Formability (HSLAS-F) Grade 50 has a specified minimum yield strength of 50 ksi.

### Available Dimensions

| Grade                  | Product type | Thickness (in) | Width (in) |
|------------------------|--------------|----------------|------------|
| HSLAS Grade 50 Class 1 | Coils        | 0.188 - 0.229  | 60 - 98    |

**Thickness:** Inquire for thicknesses <0.188 in. down to 0.079 in.

**Width:** Inquire for widths <60 in. down to 39.4 in.

### Mechanical Properties

Tensile testing is performed in the longitudinal direction.

| Grade                  | Thickness (in) | Yield strength (min ksi) | Tensile strength (min ksi) | Elongation in 2" (min %) |
|------------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| HSLAS Grade 50 Class 1 | 0.188 - 0.229  | 50                       | 65                         | 22                       |

### Chemical Composition

(Heat analysis, wt. %)

| Grade                  | C (max %) | Mn (max %) | P (max %) | S (max %) | Ti <sup>1)</sup> (min %) | V <sup>1)</sup> (min %) | Cb <sup>1)</sup> (min %) | Ni (max %) | Mo (max %) | Cu <sup>2)</sup> (min %) | Cr (max %) |
|------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------------|
| HSLAS Grade 50 Class 1 | 0.23      | 1.35       | 0.04      | 0.04      | 0.005                    | 0.005                   | 0.005                    | 0.20       | 0.06       | 0.20                     | 0.15       |

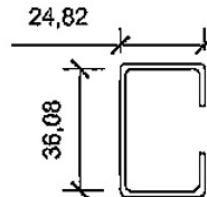
<sup>1)</sup> One or more of Cb, V, and Ti may be added. When added the min for that element applies, if not added then there is no minimum requirement.

<sup>2)</sup> Copper steel with 0.20% minimum Cu.

### Contact Information

[www.ssab.com/contact](http://www.ssab.com/contact)

Figura 45. ASTM A1011 SS Grade 50



## DIAGONAL C96 415 G

Figura 46. ASTM A1011 SS Grade 50

## B. Integración de cargas

### Carga Permanente

SC= 10 kgf/m<sup>2</sup> (láminas y tornillería)  
 10 kgf/m<sup>2</sup> (instalaciones)  
 20 kgf/m<sup>2</sup>

### Carga transitoria

CV= 50 kgf/m<sup>2</sup> AGIES NSE 2-2018 Capítulo 3

Tabla 3.7.1-1 (continuación)

| Tipo de ocupación o uso   | Wv (kg/m <sup>2</sup> ) | Pv (kg) |
|---|-------------------------|---------|
| <b>Almacenes</b>  |                         |         |
| Minoristas  | 500                     | 800     |
| Mayoristas  | 600                     | 1200    |
| <b>Bodegas</b>  |                         |         |
| Cargas livianas   | 600                     | 800     |
| Cargas pesadas  | 1200                    | 1200    |
| <b>Fábricas</b>   |                         |         |
| Industrias livianas   | 500                     | 800     |
| Industrias pesadas  | 1000                    | 1200    |
| <b>Cubiertas pesadas (Inciso 3.2 (g))</b>   |                         |         |
| Azoteas de concreto con acceso  | 200                     |         |
| Azoteas sin acceso horizontal o inclinadas  | 100                     |         |
| Azoteas con inclinación mayor de 20°  | 75 M                    |         |
| Azoteas usadas para jardín o para reuniones   | 500                     |         |
| <b>Cubiertas livianas (Inciso 3.2 (h))</b>  |                         |         |
| Techos de láminas, tejas, cubiertas plásticas, lonas, etc. (aplica a la estructura que soporta la cubierta final) | 50 PPI                  | 135     |

### Cargas accidentales

Viento forros= 80 kgf/m<sup>2</sup> ASCE 7-16 Capítulo 28

Viento fachada= 40 kgf/m<sup>2</sup> ASCE 7-16 Capítulo 28

Figura 47. ASTM A1011 SS Grade 50

## C. Integración de masa sísmica


| Unidad de carga   |   |
|---|---|
| Accesorios transporte de la carga   |   |
| <b>Tarima</b>   |   |
| Material de la tarima:  | GMA <input type="checkbox"/> CHEP <input type="checkbox"/><br>Madera <input checked="" type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/><br>Plástico <input type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/> |
| Indicar otro material: _____  |   |
| Dimensiones unidad de carga:  |   |
|  |   |
| Lado entrada: Tache la flecha entrada que no proceda.                               |   |
| ¿Sobresale el producto más que la tarima? ¿Cuánto? (mm)                             |   |
| A= 1.22   | B= 0.85   |
| C= 1.22   | D= 0.85   |
| Peso Tarima+Carga: _____ kg   |   |

Figura 48. Cálculo de 500 cajas de lápiz Mongol

### Análisis de tarima

Unidad de carga: caja de lápices marca Mongol

\*se asume que el máximo que se puede almacenar por caja por solicitud del proveedor son 500 cajas

### Dimensiones caja lápices

|     |                      |
|-----|----------------------|
| L   | 0.2 m                |
| A   | 0.1 m                |
| H   | 0.05 m               |
| Vol | 0.001 m <sup>3</sup> |

### Dimensiones tarima

|     |                      |
|-----|----------------------|
| L   | 1.22 m               |
| A   | 0.85 m               |
| H   | 1 m                  |
| Vol | 1.037 m <sup>3</sup> |

No. de cajas de lápices 1037 Se comprueba que caben 500 cajas de lápices

Cajas por viga 2

Voltot 2.074 m<sup>3</sup>

Densidad c/ caja de lápices 0.48 kg/m<sup>3</sup>

Densidad total 240 kg/m<sup>3</sup>

Peso 497.76 kg 184.355556 kg/m<sup>2</sup>  
248.88 kg

Carga total 4883.0256 N

248.88 kg/m<sup>2</sup>

Carga total 4.8830256 kN

79.7692308 kg

Carga lineal 1.6276752 kn/m

0.61851852

0.27833333

Figura 49. Cálculo carga de 500 cajas de lápiz Mongol

## D. Integración de carga de viento

### MEMORIA DE CÁLCULO INTEGRACIÓN DE CARGAS DE VIENTO

Proyecto: Bodega de almacenamiento autoportante  
Ubicación: Ciudad de Guatemala, Guatemala



Tipo de exposición al viento: B  
5.2.1 Tipo de Exposición al viento

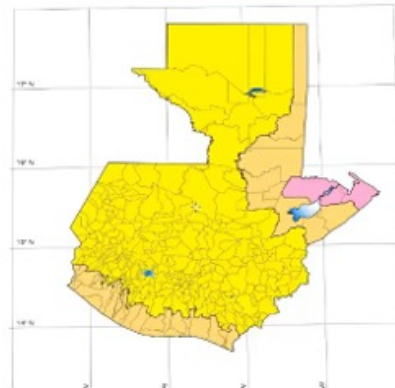
(a) *Exposición B* — El 80% del cuadrante a barlovento será urbano con edificaciones de un nivel o más o bien bosques u otras irregularidades superficiales significativas que se extiendan más de 1500 metros desde el sitio del proyecto.

#### Velocidad básica del viento:

$$V_v := 100 \frac{km}{h}$$

$$V_{va} := 62.137 \text{ mph}$$

| VELOCIDAD BÁSICA<br>10m SOBRE EL SUELO |         |
|--|---------|
|  | 120 kph |
|  | 110 kph |
|  | 100 kph |



#### Cálculo de la presión básica del viento:

$$P_Z := C_{ez} \cdot C_q \cdot q_s \cdot I_c$$

Donde:

- $P_z$  es la presión de diseño por viento, z metros sobre el suelo, en  $Kg/m^2$ ;
- $C_{ez}$  es el coeficiente de exposición y altura estipulado en la Sección 5.3.3 conforme la Tabla 5.3.3-1;
- $C_q$  es el coeficiente de presión conforme la Tabla 5.3.6-1.
- $q_s$  es la presión de remanso del viento en  $Kg/cm^2$  a la altura estándar de 10 metros conforme se establece en la Sección 5.3.2, Tabla 5.3.2-1.
- $I_c$  es el factor de importancia. Se usará 1.15 para obras Categoría IV; se usará 1.00 para las otras categorías

#### Presión básica del viento:

$$q_s := 0.0048 \cdot V_v^2 \cdot \frac{kgf}{m^2} = 48 \frac{kgf}{m^2}$$

#### Intensidad y distribución de presiones:

$$h := 11 \text{ m}$$

$$C_{ez} := 0.81$$

Figura 50. Integración cargas de viento

| Altura sobre el nivel promedio del terreno (m) <sup>[1],[2]</sup> | Exposición D | Exposición C | Exposición B |
|---|--------------|--------------|--------------|
| 4.5   | 1.39         | 1.06         | 0.62         |
| 6.0   | 1.45         | 1.13         | 0.67         |
| 7.5   | 1.50         | 1.19         | 0.72         |
| 9.0   | 1.54         | 1.23         | 0.76         |
| 12.0  | 1.62         | 1.31         | 0.84         |
| 18.0  | 1.73         | 1.43         | 0.95         |
| 24.0  | 1.81         | 1.53         | 1.04         |
| 30.0  | 1.88         | 1.61         | 1.13         |
| 36.0  | 1.93         | 1.67         | 1.20         |
| 48.0  | 2.02         | 1.79         | 1.31         |
| 60.0  | 2.10         | 1.87         | 1.42         |
| 90.0  | 2.23         | 2.05         | 1.63         |
| 120.0   | 2.34         | 2.19         | 1.80         |

[1] Alturas menores a 4.50m deben utilizar el factor  $C_e$  para 4.50m  
 [2] Alturas mayores a 4.50m pueden ser interpoladas

### Coefficiente de presión

#### 1. Sistema resistente principal

##### A. Presión sobre superficies verticales

Superficie a barlovento:  $C_{q\_ver\_bar} := 0.8$  (Empuje)

Superficie a sotavento:  $C_{q\_ver\_sot} := 0.5$  (Succión)

##### B. Presión sobre techo inclinado

Viento en x: viento perpendicular a la cumbrera

$C_{q\_techo\_sot} := 1.2$  *Succión*

Viento paralelo a la cumbrera

$C_{q\_techo\_bar} := 1.2$  *Succión*

Factor de importancia:

$I_c := 1$



Sector a barlovento:

- Pendiente  $\leq 1:6$  0.7 succión
- $1:6 < \text{Pendiente} \leq 3:4$  0.9 succión - 0.3 empuje

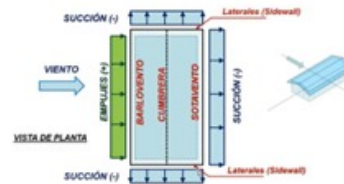


Figura 51. Integración cargas de viento

a) Superficies verticales

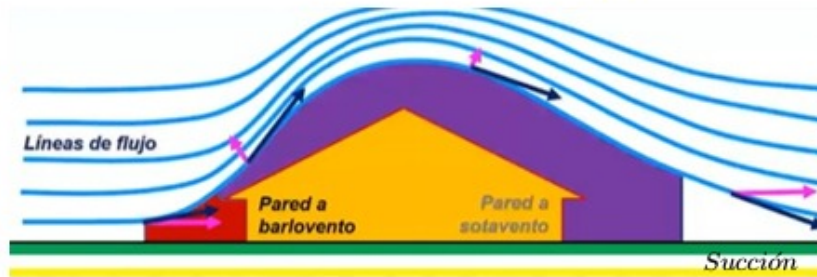
**Cálculo de las presiones de viento**

Viento x

Presión de viento en superficie:

$$P_{z\_ver\_bar} := C_{ez} \cdot C_{q\_ver\_bar} \cdot q_s \cdot I_c = 6.371 \text{ psf} \quad \text{Empuje} \quad \text{BARL}$$

$$P_{z\_ver\_sot} := C_{ez} \cdot C_{q\_ver\_sot} \cdot q_s \cdot I_c = 3.982 \text{ psf} \quad \text{Succión} \quad \text{SOT}$$



Viento y

$$P_{z\_ver\_bar} := C_{ez} \cdot C_{q\_ver\_bar} \cdot q_s \cdot I_c = 6.371 \text{ psf} \quad \text{Empuje} \quad \text{BARL}$$

$$P_{z\_ver\_sot} := C_{ez} \cdot C_{q\_ver\_sot} \cdot q_s \cdot I_c = 3.982 \text{ psf} \quad \text{Succión} \quad \text{SOT}$$

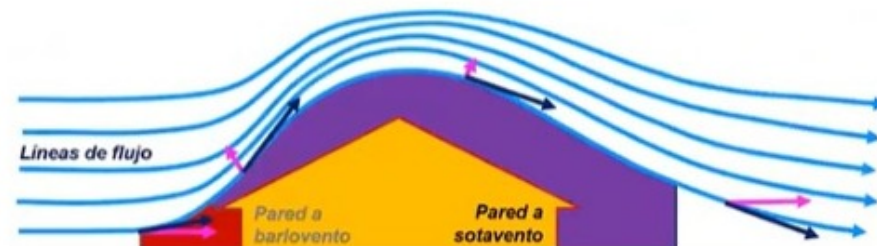


Figura 52. Integración cargas de viento

b) Superficies techo inclinado

Presión del viento sobre el techo inclinado

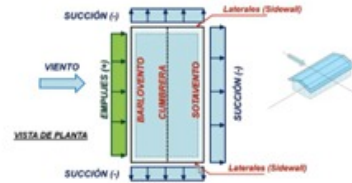
Viento x

$$P_{sot\_techo\_s} := C_{ez} \cdot C_{q\_techo\_sot} \cdot q_s \cdot I_c = 9.556 \text{ psf} \text{ Succión} \quad \text{SOT}$$

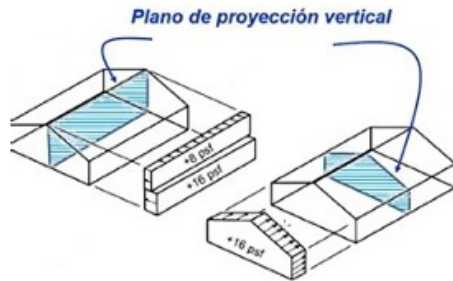
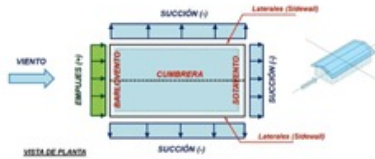
$$P_{bar\_techo\_s} := C_{ez} \cdot C_{q\_techo\_bar} \cdot q_s \cdot I_c = 9.556 \text{ psf} \text{ Succión} \quad \text{BARL}$$

Viento en y: Viento paralelo a la cumbrera

$$P_{suc\_techo\_s} := C_{ez} \cdot C_{q\_techo\_sot} \cdot q_s \cdot I_c = 9.556 \text{ psf} \text{ Succión}$$



Empuje



Viento x

BARL

$$centro := P_{z\_ver\_bar} \cdot 28.707 \text{ ft} = 182.881 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$centro = 272.157 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \text{ Empuje}$$

$$esquina := P_{z\_ver\_bar} \cdot 14.354 \text{ ft} = 91.444 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$esquina = 136.083 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \text{ Empuje}$$

SOT

$$centro := P_{z\_ver\_sot} \cdot 28.707 \text{ ft} = 114.301 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$centro = 170.098 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \text{ Succión}$$

$$esquina := P_{z\_ver\_sot} \cdot 14.354 \text{ ft} = 57.152 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$esquina = 85.052 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \text{ Succión}$$

Figura 53. Integración cargas de viento

Viento y

*BARL*

$$\text{centro} := P_{z\_ver\_bar} \cdot 9.843 \text{ ft} = 62.706 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{centro} = 93.317 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Empuje}$$

$$\text{esquina} := P_{z\_ver\_bar} \cdot 4.921 \text{ ft} = 31.35 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{esquina} = 46.654 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Empuje}$$

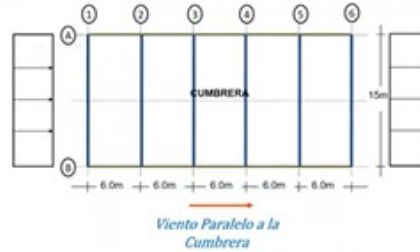
*SOT*

$$\text{centro} := P_{z\_ver\_sot} \cdot 9.843 \text{ ft} = 39.191 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{centro} = 58.323 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Succión}$$

$$\text{esquina} := P_{z\_ver\_sot} \cdot 4.921 \text{ ft} = 19.594 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{esquina} = 29.158 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Succión}$$



Viento x

*BARL*

$$\text{centro} := P_{bar\_techo\_s} \cdot 3.412 \text{ ft} = 32.605 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{centro} = 48.521 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Succión}$$

$$\text{esquina} := P_{bar\_techo\_s} \cdot 1.706 \text{ ft} = 16.302 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{esquina} = 24.261 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Succión}$$

*SOT*

$$\text{centro} := P_{sot\_techo\_s} \cdot 3.412 \text{ ft} = 32.605 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{centro} = 48.521 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Succión}$$

$$\text{esquina} := P_{sot\_techo\_s} \cdot 1.706 \text{ ft} = 16.302 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$\text{esquina} = 24.261 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Succión}$$

Figura 54. Integración cargas de viento

Viento y

$$centro := P_{suc\_techo_s} \cdot 9.843 \text{ ft} = 94.059 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$centro = 139.975 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad \text{Sución}$$

$$esquina := P_{suc\_techo_s} \cdot 4.921 \text{ ft} = 47.025 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$$

$$esquina = 69.98 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad \text{Sución}$$

Figura 55. Integración cargas de viento

## E. Espectro sísmico

|  |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
|--|--------------------------------|-----|-----------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----|--------|--------|-----|
| Ubicación  | Ciudad de Guatemala, Guatemala |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| Clase de obra  | Ordinaria                      |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| Tipo de Suelo D  |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| I <sub>o</sub>   | 4.2                            | No. | Municipio | Departamento | Amenaza sísmica |                 | Velocidad básica del viento (kph) |                 |     |        |        |     |
| Sc <sub>r</sub>  | 1.5                            |     |           |              | I <sub>o</sub>  | S <sub>cr</sub> |                                   | S <sub>1r</sub> |     |        |        |     |
| S <sub>1r</sub>  | 0.55                           |     |           |              | 78              | Guatemala       |                                   | Guatemala       | 4.2 | 1.50 g | 0.55 g | 100 |
| TL   | 3.26                           |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
|  |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| 4.5.5 Probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos de diseño |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| K <sub>d</sub>   | 0.8                            |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| 4.5.3 Coeficientes de Sitio                                      |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| F <sub>a</sub>   | 1                              |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| F <sub>v</sub>   | 1.7                            |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| N <sub>a</sub>   | 1                              |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| N <sub>v</sub>   | 1                              |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| Sc <sub>s</sub>  | 1.5                            |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| S <sub>1s</sub>  | 0.935                          |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| 4.5.5 [c] Parámetros del espectro                                |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| Sc <sub>d</sub>  | 1.2                            |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| S <sub>1d</sub>  | 0.748                          |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| 4.5.4 - Períodos de vibración de Transición                      |                                |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| T <sub>s</sub>   | 0.623333                       |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| T <sub>0</sub>   | 0.124667                       |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |
| TL   | 3.26                           |     |           |              |                 |                 |                                   |                 |     |        |        |     |

Figura 56. Integración cargas de viento

| TL   | Tipo de Suelo D |        |
|------|-----------------|--------|
|      | Sa              | Sd     |
| 0.10 | 1.0575          | 0.0026 |
| 0.20 | 1.2000          | 0.0119 |
| 0.30 | 1.2000          | 0.0268 |
| 0.40 | 1.2000          | 0.0477 |
| 0.50 | 1.2000          | 0.0745 |
| 0.60 | 1.2000          | 0.1073 |
| 0.70 | 1.0686          | 0.1301 |
| 0.80 | 0.9350          | 0.1487 |
| 0.90 | 0.8311          | 0.1673 |
| 1.00 | 0.7480          | 0.1859 |
| 1.10 | 0.6800          | 0.2045 |
| 1.20 | 0.6233          | 0.2230 |
| 1.30 | 0.5754          | 0.2416 |
| 1.40 | 0.5343          | 0.2602 |
| 1.50 | 0.4987          | 0.2788 |
| 1.60 | 0.4675          | 0.2974 |
| 1.70 | 0.4400          | 0.3160 |
| 1.80 | 0.4156          | 0.3346 |
| 1.90 | 0.3937          | 0.3532 |
| 2.00 | 0.3740          | 0.3717 |
| 2.10 | 0.3562          | 0.3903 |
| 2.20 | 0.3400          | 0.4089 |
| 2.30 | 0.3252          | 0.4275 |
| 2.40 | 0.3117          | 0.4461 |
| 2.50 | 0.2992          | 0.4647 |
| 2.60 | 0.2877          | 0.4833 |
| 2.70 | 0.2770          | 0.5019 |
| 2.80 | 0.2671          | 0.5204 |
| 2.81 | 0.2662          | 0.5223 |
| 2.90 | 0.2579          | 0.5390 |

Figura 57. Parámetros espectro sísmico

| TL   | Tipo de Suelo D |        |
|------|-----------------|--------|
|      | Sa              | Sd     |
| 3.00 | 0.2493          | 0.5576 |
| 3.10 | 0.2413          | 0.5762 |
| 3.20 | 0.2338          | 0.5948 |
| 3.30 | 0.2239          | 0.6059 |
| 3.40 | 0.2109          | 0.6059 |
| 3.50 | 0.1991          | 0.6059 |
| 3.60 | 0.1882          | 0.6059 |
| 3.70 | 0.1781          | 0.6059 |
| 3.80 | 0.1689          | 0.6059 |
| 3.90 | 0.1603          | 0.6059 |
| 4.00 | 0.1524          | 0.6059 |
| 4.10 | 0.1451          | 0.6059 |
| 4.11 | 0.1444          | 0.6059 |
| 4.12 | 0.1437          | 0.6059 |
| 4.13 | 0.1430          | 0.6059 |
| 4.14 | 0.1423          | 0.6059 |
| 4.15 | 0.1416          | 0.6059 |
| 4.16 | 0.1409          | 0.6059 |
| 4.17 | 0.1402          | 0.6059 |
| 4.18 | 0.1396          | 0.6059 |
| 4.19 | 0.1389          | 0.6059 |
| 4.20 | 0.1382          | 0.6059 |
| 4.21 | 0.1376          | 0.6059 |
| 4.22 | 0.1369          | 0.6059 |
| 4.23 | 0.1363          | 0.6059 |
| 4.24 | 0.1356          | 0.6059 |
| 4.25 | 0.1350          | 0.6059 |
| 4.26 | 0.1344          | 0.6059 |
| 4.27 | 0.1337          | 0.6059 |
| 4.28 | 0.1331          | 0.6059 |
| 4.29 | 0.1325          | 0.6059 |

Figura 58. Espectro sísmico

| TL   | Tipo de Suelo D |        |
|------|-----------------|--------|
|      | Sa              | Sd     |
| 4.30 | 0.1319          | 0.6059 |
| 4.31 | 0.1313          | 0.6059 |
| 4.32 | 0.1307          | 0.6059 |
| 4.33 | 0.1301          | 0.6059 |
| 4.34 | 0.1295          | 0.6059 |
| 4.35 | 0.1289          | 0.6059 |
| 4.36 | 0.1283          | 0.6059 |
| 4.37 | 0.1277          | 0.6059 |
| 4.38 | 0.1271          | 0.6059 |
| 4.39 | 0.1265          | 0.6059 |
| 4.40 | 0.1260          | 0.6059 |
| 4.41 | 0.1254          | 0.6059 |
| 4.42 | 0.1248          | 0.6059 |
| 4.43 | 0.1243          | 0.6059 |
| 4.44 | 0.1237          | 0.6059 |
| 4.45 | 0.1231          | 0.6059 |
| 4.46 | 0.1226          | 0.6059 |
| 4.47 | 0.1220          | 0.6059 |
| 4.48 | 0.1215          | 0.6059 |
| 4.49 | 0.1210          | 0.6059 |
| 4.50 | 0.1204          | 0.6059 |
| 4.60 | 0.1152          | 0.6059 |
| 4.80 | 0.1058          | 0.6059 |
| 4.90 | 0.1016          | 0.6059 |
| 5.00 | 0.0975          | 0.6059 |

*Figura 59. Espectro sísmico*

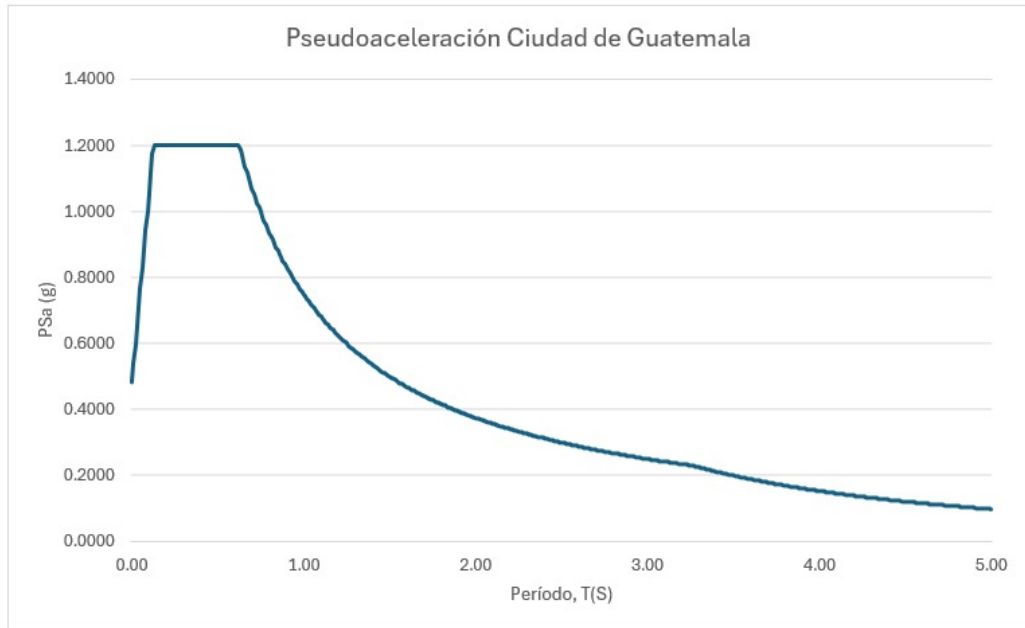


Figura 60. Gráfico de pseudoaceleración

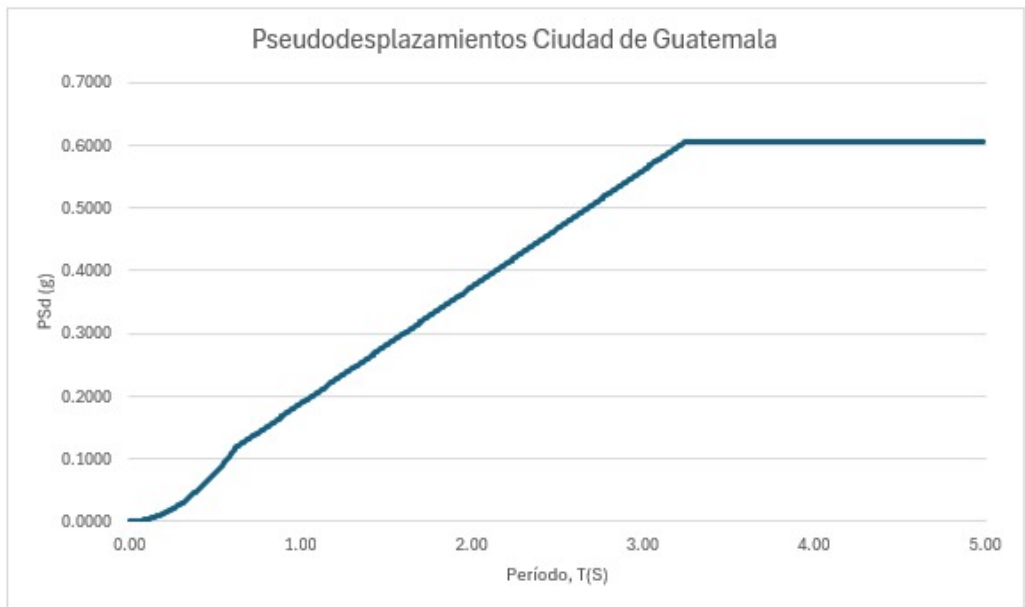


Figura 61. Gráfico de pseudodesplazamientos

**F. Cortante basal Caso 1**

| <b>Datos</b>               |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Sistema Estructural</b> | <b>Estructura Combinada</b> |
| <b>Tfx</b>                 | 0.661 s                     |
| <b>Tfy</b>                 | 0.925 s                     |
| <b>ht</b>                  | 12 m                        |
| <b>Ws</b>                  | 336 ton                     |
| <b>Ws/A</b>                | 0.23 ton/m <sup>2</sup>     |
| <b>Sin irregularidades</b> |                             |

| <b>Datos Sistema Estructural</b> |         |
|----------------------------------|---------|
| <b>R</b>                         | 3.25    |
| <b>Omega</b>                     | 2 E3 RD |
| <b>Cd</b>                        | 3.25 BD |
| <b>Beta</b>                      | 1.00107 |

| <b>De Espectro Sísmico</b> |                  |
|----------------------------|------------------|
| <b>Sa(Tx)</b>              | 1.13161 Espectro |
| <b>Sy(Ty)</b>              | 0.81 Espectro    |
| <b>Scd</b>                 | 1.20 s           |
| <b>S1d</b>                 | 0.75 s           |
| <b>Kd</b>                  | 0.80             |

**Datos del ejercicio anterior**

|           |      |
|-----------|------|
| <b>Ts</b> | 0.62 |
| <b>T0</b> | 0.12 |
| <b>TL</b> | 3.26 |

| <b>Datos Sistema Estructural</b> |         |
|----------------------------------|---------|
| <b>R</b>                         | 3.5     |
| <b>Omega</b>                     | 3 E1-BD |
| <b>Cd</b>                        | 3 BD    |
| <b>Beta</b>                      | 1.00107 |

*Figura 62. Datos para la obtención de cortante basal*

|                            |                           |                |
|----------------------------|---------------------------|----------------|
| <b>Area Construida</b>     | 1470                      | m <sup>2</sup> |
| <b>Sistema Estructural</b> | Marcos de baja ductilidad |                |
| <b>hn</b>                  | 12                        | m              |
| <b>lo</b>                  | 4.1                       |                |

*Figura 63. Datos para la obtención de cortante basal*

| Análisis Modal Espectral X                     |                 |
|--|-----------------|
| <b>Período empírico de estructura</b>          |                 |
| estructural                                    | 3               |
| Kt   | 0.049           |
| x  | 0.75            |
| h  | 12 m            |
| Ta   | 0.32 s          |
| 1.4*Tax  | 0.442 s         |
| <b>Selección del período mínimo</b>            |                 |
| Tx   | 0.661 ton/m2    |
| Ty   | 0.736 g         |
| Ws/A   | 0.23 g          |
| <b>Pseudoaceleraciones con periodo</b>         |                 |
| Sa(Tx)   | 1.131618759     |
| Sy(Ty)   | 1.016473519     |
| <b>Cs para dirección de análisis</b>           |                 |
| Csx  | 0.348190388     |
| Csy  | 0.290421005     |
| <b>Factor Fd</b>                               |                 |
| Fdx  | 2.47            |
| Fdy  | 2.29            |
| Fdx  | 1.00            |
| Fdy  | 1.00            |
| <b>Revisión de mínimos Cs</b>                  |                 |
| Csx min  | 0.13            |
| Csy min  | 0.12            |
| <b>Revisión de mínimos Cs (Solo si lo=4.2)</b> |                 |
| Csx min  | 0.27            |
| Csy min  | 0.25            |
| <b>Valores Finales</b>                         |                 |
| Csx  | 0.35            |
| Csy  | 0.29            |
| <b>Vb Estático</b>                             |                 |
| V1X  | 116.9919702 ton |
| V1Y  | 97.58145782 ton |

NO APLICA lo=4.1

Figura 64. Análisis modal espectral

| Período empírico de estructura |         |
|--------------------------------|---------|
| Sistema estructural            | 1       |
| Kt                             | 0.072   |
| x                              | 0.80    |
| h                              | 12 m    |
| Ta                             | 0.53 s  |
| 1.4*Tay                        | 0.736 s |

Figura 65. Análisis modal espectral dirección Y

| Tiene Irregularidades | Calibración DISEÑO |     |
|-----------------------|--------------------|-----|
| I                     |                    | no  |
| Vdx                   | 99.44317468        | ton |
| Vdy                   | 82.94423914        | ton |

Figura 66. Análisis modal espectral dirección Y

| Tiene Irregularidades | Calibración ETABS |     |
|-----------------------|-------------------|-----|
| I                     |                   | no  |
| Vex                   | 74.0992           | ton |
| Vey                   | 72.3358           | ton |

Figura 67. Calibración de diseño AGIES

| Calibración cortantes estáticos FACTOR |             |
|--|-------------|
| Tiene irregularidades                  | No          |
| Fx                                     | 1.342027642 |
| Fy                                     | 1.146655448 |
| Calibración X                          | 4.050858822 |
| Calibración Y                          | 3.213911412 |

Figura 68. Calibración primera corrida ETABS

|           | Análisis dinámico SIN calibración | Diseño AGIES | Calibrado |
|-----------|-----------------------------------|--------------|-----------|
| Vx (tonf) | 74.10                             | 99.44        | 85.26     |
| Vy (tonf) | 72.34                             | 82.94        | 72.36     |

Figura 69. Comparativa cortante basal

**G. Cortante basal Caso 2**

| Datos               |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Sistema Estructural | Estructura Combinada    |
| Tfx                 | 0.711 s                 |
| Tfy                 | 0.561 s                 |
| ht                  | 12 m                    |
| Ws                  | 336 ton                 |
| Ws/A                | 0.23 ton/m <sup>2</sup> |
| Sin irregularidades |                         |

| Datos Sistema Estructural |           |
|---------------------------|-----------|
| R                         | 3.25      |
| Omega                     | 2   E3 RD |
| Cd                        | 3.25 BD   |
| Beta                      | 1.00107   |

| De Espectro Sísmico |                  |
|---------------------|------------------|
| Sa(Tx)              | 1.13161 Espectro |
| Sy(Ty)              | 0.81 Espectro    |
| Scd                 | 1.20 s           |
| S1d                 | 0.75 s           |
| Kd                  | 0.80             |

| Datos del ejercicio anterior |      |
|------------------------------|------|
| Ts                           | 0.62 |
| T0                           | 0.12 |
| TL                           | 3.26 |

| Datos Sistema Estructural |           |
|---------------------------|-----------|
| R                         | 3.5       |
| Omega                     | 3   E1-BD |
| Cd                        | 3 BD      |
| Beta                      | 1.00107   |

Figura 70. Datos caso 2 para obtención de cortante basal

| Período empírico de estructura |         |
|--------------------------------|---------|
| Sistema estructural            | 1       |
| Kt                             | 0.072   |
| $\alpha$                       | 0.80    |
| h                              | 12 m    |
| Ta                             | 0.53 s  |
| 1.4 Ta                         | 0.736 s |

Figura 71. Análisis modal dirección Y

| <b>Análisis Modal Espectral X</b>            |                 |
|--|-----------------|
| <b>Período empírico de estructura</b>        |                 |
| Sistema estructural                          | 3               |
| Kt   | 0.049           |
| $\alpha$                                     | 0.75            |
| h  | 12 m            |
| Ta   | 0.32 s          |
| 1.4*Tax                                      | 0.442 s         |
| <b>Selección del período mínimo</b>          |                 |
| Tx   | 0.711 ton/m2    |
| Ty   | 0.736 g         |
| Wsl/A  | 0.23 g          |
| <b>Pseudoaceleraciones con</b>               |                 |
| Sa(Tx)                                       | 1.052039381     |
| Sy(Ty)                                       | 1.016473519     |
| <b>Cs para dirección de análisis</b>         |                 |
| Csx  | 0.323704425     |
| Csy  | 0.290421005     |
| <b>Factor Fd</b>                             |                 |
| Fdx  | 2.35            |
| Fdy  | 2.29            |
| Fdx  | 1.00            |
| Fdy  | 1.00            |
| <b>Revisión de mínimos Cs</b>                |                 |
| Csx min                                      | 0.12            |
| Csy min                                      | 0.12            |
| <b>Revisión de mínimos Cs (Solo si lo=4)</b> |                 |
| Csx min                                      | 0.26            |
| Csy min                                      | 0.25            |
| <b>Valores Finales</b>                       |                 |
| Csx  | 0.32            |
| Csy  | 0.29            |
| <b>Vb Estático</b>                           |                 |
| VIX  | 108.7646868 ton |
| VTY  | 97.58145782 ton |

Figura 72. Análisis modal dirección X

| Tiene Irregularidades | Calibración DISEÑO |            |
|-----------------------|--------------------|------------|
|                       | I                  | no         |
|                       | Vdx                | 92.450 ton |
|                       | Vdy                | 82.944 ton |

Figura 73. Calibración diseño AGIES

| Tiene Irregularidades | Calibración ETABS |           |
|-----------------------|-------------------|-----------|
|                       | I                 | no        |
|                       | Vex               | 53.78 ton |
|                       | Vey               | 50.70 ton |

Figura 74. Calibración primera corrida ETABS

| Calibración cortantes estáticos FACTOR |             |
|--|-------------|
| Tiene irregularidades                  | No          |
| Fx                                     | 1.718947542 |
| Fy                                     | 1.636123039 |
| Calibración x                          | 5.188577043 |
| Calibración y                          | 4.585819147 |

Figura 75. Factor de calibración

|    | Análisis dinámico SIN calibración | Diseño AGIES | Calibrado |
|----|-----------------------------------|--------------|-----------|
| Vx | 53.7829                           | 92.44998377  | 92.4795   |
| Vy | 50.6956                           | 82.944       | 82.9723   |

Figura 76. Comparativa cortante basal

## H. Cortante basal Caso 3

| Datos               |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Sistema Estructural | Estructura Combinada    |
| Tfx                 | 0.726 s                 |
| Tfy                 | 0.613 s                 |
| ht                  | 12 m                    |
| Ws                  | 288 ton                 |
| Ws/A                | 0.20 ton/m <sup>2</sup> |
| Sin irregularidades |                         |

| Datos Sistema Estructural |           |
|---------------------------|-----------|
| R                         | 3.25      |
| Omega                     | 2   E3 RO |
| Cd                        | 3.25 BD   |
| Beta                      | 1.00107   |

| De Espectro Sísmico |                  |
|---------------------|------------------|
| Sa(Tx)              | 1.13161 Espectro |
| Sy(Ty)              | 0.81 Espectro    |
| Scd                 | 1.20 s           |
| S1d                 | 0.75 s           |
| Kd                  | 0.80             |

| Datos del ejercicio anterior |      |
|------------------------------|------|
| Ts                           | 0.62 |
| T0                           | 0.12 |
| TL                           | 3.26 |

| Datos Sistema Estructural |           |
|---------------------------|-----------|
| R                         | 3.5       |
| Omega                     | 3   E1-BD |
| Cd                        | 3 BD      |
| Beta                      | 1.00107   |

Figura 77. Datos caso 3 para obtención de cortante basal

| Periodo empírico de estructura |         |
|--------------------------------|---------|
| Sistema estructural            | 1       |
| Kt                             | 0.072   |
| x                              | 0.80    |
| h                              | 12 m    |
| Ta                             | 0.53 s  |
| 1.4*Tay                        | 0.736 s |

Figura 78. Análisis modal dirección Y

| Análisis Modal Espectral X                                      |                 |
|---|-----------------|
| <b>Período empírico de estructura</b>                           |                 |
| Sistema estructural   | 3               |
| Kt  | 0.049           |
| x   | 0.75            |
| h   | 12 m            |
| Ta  | 0.32 s          |
| 1.4*Tax   | 0.442 s         |
| <b>Selección del período mínimo</b>                             |                 |
| Tx  | 0.726 ton/m2    |
| Ty  | 0.736 g         |
| Ws/A  | 0.20 g          |
| <b>Pseudoaceleraciones con periodo</b>                          |                 |
| Sa(Tx)  | 1.03030303      |
| Sy(Ty)  | 1.016473519     |
| <b>Cs para dirección de análisis</b>                            |                 |
| Csx   | 0.317016317     |
| Csy   | 0.290421005     |
| <b>Factor Fd</b>  |                 |
| Fdx   | 2.31            |
| Fdy   | 2.29            |
| Fdx   | 1.00            |
| Fdy   | 1.00            |
| <b>Revisión de mínimos Cs</b>                                   |                 |
| Csx min   | 0.12            |
| Csy min   | 0.12            |
| <b>Revisión de mínimos Cs (Solo si lo=4.2)</b> NO APLICA lo=4.1 |                 |
| Csx min   | 0.26            |
| Csy min   | 0.25            |
| <b>Valores Finales</b>  |                 |
| Csx   | 0.32            |
| Csy   | 0.29            |
| <b>Vb Estático</b>  |                 |
| V1X   | 91.28484848 ton |
| V1Y   | 83.62672851 ton |

Figura 79. Análisis modal dirección X

| Tiene Irregularidades |  | Calibración DISEÑO |     |
|-----------------------|--|--------------------|-----|
| I                     |  |                    | no  |
| Vdx                   |  | 77.59212121        | ton |
| Vdy                   |  | 71.08271923        | ton |

Figura 80. Calibración diseño AGIES

| Tiene Irregularidades |  | Calibración ETABS |     |
|-----------------------|--|-------------------|-----|
| I                     |  |                   | no  |
| Vex                   |  | 28.96             | ton |
| Vey                   |  | 37.15             | ton |

Figura 81. Calibración primera corrida ETABS

| Calibración cortantes estáticos FACTOR |      |
|--|------|
| Tiene irregularidades                  | No   |
| Fx                                     | 2.68 |
| Fy                                     | 1.91 |
| Calibración X                          | 8.09 |
| Calibración Y                          | 5.36 |

Figura 82. Factor de calibración

|           | Análisis dinámico<br>SIN calibración | Diseño AGIES | Calibrado |
|-----------|--------------------------------------|--------------|-----------|
| Vx (tonf) | 28.96                                | 77.59        | 77.62     |
| Vy (tonf) | 37.15                                | 71.08        | 71.11     |

Figura 83. Comparativa cortante basal

## I. Verificación de derivas

| Story  | Label | Unique Name | Output Case     | Case Type       | Step Type | Ux       | Uy       | Ux/h      | Uy/h     | C/NC | C/NC |
|--------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|------|------|
|        |       |             |                 |                 |           | m        | m        |           |          |      |      |
| Story1 | 35    | 71          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065544 | 0.00183  | 0.0065544 | 0.000183 | -    | -    |
| Story1 | 35    | 71          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000663 | 0.037829 | 0.0000663 | 0.003783 | -    | -    |
| Story1 | 84    | 149         | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065563 | 0.001746 | 0.0065563 | 0.000175 | -    | -    |
| Story1 | 84    | 149         | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000663 | 0.043428 | 0.0000663 | 0.004343 | -    | -    |
| Story1 | 112   | 88          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065401 | 0.001285 | 0.0065401 | 0.000129 | -    | -    |
| Story1 | 112   | 88          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.046575 | 0.0000662 | 0.004658 | -    | -    |
| Story1 | 113   | 90          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065402 | 0.001238 | 0.0065402 | 0.000124 | -    | -    |
| Story1 | 113   | 90          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.04644  | 0.0000662 | 0.004644 | -    | -    |
| Story1 | 144   | 124         | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065387 | 0.001485 | 0.0065387 | 0.000149 | -    | -    |
| Story1 | 144   | 124         | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.045477 | 0.0000662 | 0.004548 | -    | -    |
| Story1 | 331   | 196         | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065401 | 0.001555 | 0.0065401 | 0.000156 | -    | -    |
| Story1 | 331   | 196         | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.04647  | 0.0000662 | 0.004647 | -    | -    |
| Story1 | 332   | 197         | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065385 | 0.002098 | 0.0065385 | 0.00021  | -    | -    |
| Story1 | 332   | 197         | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.045606 | 0.0000662 | 0.004561 | -    | -    |
| Story1 | 4     | 5           | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065525 | 0.001832 | 0.0065525 | 0.000183 | -    | -    |
| Story1 | 4     | 5           | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000665 | 0.037388 | 0.0000665 | 0.003739 | -    | -    |
| Story1 | 5     | 6           | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065545 | 0.001454 | 0.0065545 | 0.000145 | -    | -    |
| Story1 | 5     | 6           | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000664 | 0.042558 | 0.0000664 | 0.004256 | -    | -    |
| Story1 | 95    | 74          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065378 | 0.002158 | 0.0065378 | 0.000216 | -    | -    |
| Story1 | 95    | 74          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.045352 | 0.0000662 | 0.004535 | -    | -    |
| Story1 | 96    | 76          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065383 | 0.003228 | 0.0065383 | 0.000323 | -    | -    |
| Story1 | 96    | 76          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.044433 | 0.0000662 | 0.004443 | -    | -    |
| Story1 | 97    | 78          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065396 | 0.003478 | 0.0065396 | 0.000348 | -    | -    |
| Story1 | 97    | 78          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.044763 | 0.0000662 | 0.004476 | -    | -    |
| Story1 | 99    | 80          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065435 | 0.001004 | 0.0065435 | 0.0001   | -    | -    |
| Story1 | 99    | 80          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.046672 | 0.0000662 | 0.004667 | -    | -    |
| Story1 | 105   | 82          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065474 | 0.002768 | 0.0065474 | 0.000277 | -    | -    |
| Story1 | 105   | 82          | SISMOY_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.000662 | 0.050364 | 0.0000662 | 0.005036 | -    | -    |
| Story1 | 111   | 75          | SISMOX_DRE<br>F | LinRespS<br>pec | Max       | 0.065508 | 0.002701 | 0.0065508 | 0.00027  | -    | -    |

Figura 84. Verificación derivas caso 1

| Story  | Label | Unique Name | Output Case | Case Type    | Step Type | Ux     | Uy     | Ux/h     | Uy/h   | C/N C | C/N C |
|--------|-------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------|--------|----------|--------|-------|-------|
|        |       |             |             |              |           | m      | m      |          |        |       |       |
| Story1 | 8314  | 9977        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0346 | 0.0024 | 0.003464 | 0.0002 | -     |       |
| Story1 | 8314  | 9977        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0536 | 1.97E-05 | 0.0054 |       | -     |
| Story1 | 8315  | 9978        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0346 | 0.0028 | 0.00346  | 0.0003 | -     |       |
| Story1 | 8315  | 9978        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0545 | 1.96E-05 | 0.0054 |       | -     |
| Story1 | 8316  | 9979        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0346 | 0.0032 | 0.003459 | 0.0003 | -     |       |
| Story1 | 8316  | 9979        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0552 | 1.94E-05 | 0.0055 |       | -     |
| Story1 | 8431  | 9982        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0346 | 0.0018 | 0.003461 | 0.0002 | -     |       |
| Story1 | 8431  | 9982        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.055  | 2.09E-05 | 0.0055 |       | -     |
| Story1 | 8432  | 9983        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0346 | 0.0021 | 0.003458 | 0.0002 | -     |       |
| Story1 | 8432  | 9983        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0551 | 2.11E-05 | 0.0055 |       | -     |
| Story1 | 8433  | 9984        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0347 | 0.0018 | 0.003465 | 0.0002 | -     |       |
| Story1 | 8433  | 9984        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0549 | 2.07E-05 | 0.0055 |       | -     |
| Story1 | 8777  | 3312        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0348 | 0.0012 | 0.003481 | 0.0001 | -     |       |
| Story1 | 8777  | 3312        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0498 | 2.02E-05 | 0.005  |       | -     |
| Story1 | 1754  | 1751        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0347 | 0.0022 | 0.003468 | 0.0002 | -     |       |
| Story1 | 1754  | 1751        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0488 | 1.85E-05 | 0.0049 |       | -     |
| Story1 | 1738  | 1750        | SISMOX_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0347 | 0.0018 | 0.003471 | 0.0002 | -     |       |
| Story1 | 1738  | 1750        | SISMOY_DREF | LinResp Spec | Max       | 0.0002 | 0.0358 | 2.38E-05 | 0.0036 |       | -     |

Figura 85. Verificación derivas caso 1

| Story  | Label | Unique Name | Output Case  | Case Type   | Step Type | Ux       | Uy       | Ux/h      | Uy/h     | C/NC | C/NC |
|--------|-------|-------------|--------------|-------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|------|------|
|        |       |             |              |             |           | m        | m        |           |          |      |      |
| Story1 | 35    | 71          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057299 | 0.002724 | 0.0057299 | 0.000272 | -    | -    |
| Story1 | 35    | 71          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000659 | 0.027018 | 0.0000659 | 0.002702 |      |      |
| Story1 | 84    | 149         | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057322 | 0.002648 | 0.0057322 | 0.000265 | -    | -    |
| Story1 | 84    | 149         | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000659 | 0.032767 | 0.0000659 | 0.003277 |      |      |
| Story1 | 112   | 88          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057247 | 0.001409 | 0.0057247 | 0.000141 | -    | -    |
| Story1 | 112   | 88          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000656 | 0.033591 | 0.0000656 | 0.003359 |      |      |
| Story1 | 113   | 90          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057248 | 0.001428 | 0.0057248 | 0.000143 | -    | -    |
| Story1 | 113   | 90          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000657 | 0.033442 | 0.0000657 | 0.003344 |      |      |
| Story1 | 144   | 124         | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057241 | 0.001547 | 0.0057241 | 0.000155 | -    | -    |
| Story1 | 144   | 124         | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000657 | 0.032329 | 0.0000657 | 0.003233 |      |      |
| Story1 | 331   | 196         | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057248 | 0.0015   | 0.0057248 | 0.00015  | -    | -    |
| Story1 | 331   | 196         | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000656 | 0.03347  | 0.0000656 | 0.003347 |      |      |
| Story1 | 332   | 197         | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057241 | 0.001729 | 0.0057241 | 0.000173 | -    | -    |
| Story1 | 332   | 197         | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000656 | 0.032483 | 0.0000656 | 0.003248 |      |      |
| Story1 | 4     | 5           | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057279 | 0.001849 | 0.0057279 | 0.000185 | -    | -    |
| Story1 | 4     | 5           | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000656 | 0.026101 | 0.0000656 | 0.00261  |      |      |
| Story1 | 5     | 6           | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057303 | 0.001771 | 0.0057303 | 0.000177 | -    | -    |
| Story1 | 5     | 6           | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000657 | 0.03163  | 0.0000657 | 0.003163 |      |      |
| Story1 | 95    | 74          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057238 | 0.001756 | 0.0057238 | 0.000176 | -    | -    |
| Story1 | 95    | 74          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000656 | 0.032183 | 0.0000656 | 0.003218 |      |      |
| Story1 | 96    | 76          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057261 | 0.00245  | 0.0057261 | 0.000245 | -    | -    |
| Story1 | 96    | 76          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000655 | 0.030967 | 0.0000655 | 0.003097 |      |      |
| Story1 | 97    | 78          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057289 | 0.002543 | 0.0057289 | 0.000254 | -    | -    |
| Story1 | 97    | 78          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000655 | 0.030839 | 0.0000655 | 0.003084 |      |      |
| Story1 | 99    | 80          | SISMOX_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.057296 | 0.000885 | 0.0057296 | 8.85E-05 | -    | -    |
| Story1 | 99    | 80          | SISMOY_DREFF | LinRespSpec | Max       | 0.000655 | 0.032417 | 0.0000655 | 0.003242 |      |      |

Figura 86. Verificación derivas caso 2

| Story  | Label | Unique Name | Output Case | Case Type   | Step Type | Ux       | Uy       | Ux/h      | Uy/h     | C/NC | C/NC |
|--------|-------|-------------|-------------|-------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|------|------|
|        |       |             |             |             |           | m        | m        |           |          |      |      |
| Story1 | 7622  | 9143        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027549 | 0.001397 | 0.0027549 | 0.00014  | -    | -    |
| Story1 | 7622  | 9143        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000227 | 0.035022 | 0.0000227 | 0.003502 |      |      |
| Story1 | 7662  | 9183        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027535 | 0.001443 | 0.0027535 | 0.000144 | -    | -    |
| Story1 | 7662  | 9183        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000229 | 0.033788 | 0.0000229 | 0.003379 |      |      |
| Story1 | 7663  | 9184        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.02755  | 0.001625 | 0.002755  | 0.000163 | -    | -    |
| Story1 | 7663  | 9184        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000232 | 0.032672 | 0.0000232 | 0.003267 |      |      |
| Story1 | 7943  | 9476        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.057276 | 0.002248 | 0.0057276 | 0.000225 | -    | -    |
| Story1 | 7943  | 9476        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000661 | 0.041774 | 0.0000661 | 0.004177 |      |      |
| Story1 | 7944  | 9477        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.057274 | 0.00176  | 0.0057274 | 0.000176 | -    | -    |
| Story1 | 7944  | 9477        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.00066  | 0.041717 | 0.000066  | 0.004172 |      |      |
| Story1 | 7945  | 9478        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.057278 | 0.002874 | 0.0057278 | 0.000287 | -    | -    |
| Story1 | 7945  | 9478        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000661 | 0.040375 | 0.0000661 | 0.004038 |      |      |
| Story1 | 8314  | 9977        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027469 | 0.002474 | 0.0027469 | 0.000247 | -    | -    |
| Story1 | 8314  | 9977        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000234 | 0.039814 | 0.0000234 | 0.003981 |      |      |
| Story1 | 8315  | 9978        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027441 | 0.002798 | 0.0027441 | 0.00028  | -    | -    |
| Story1 | 8315  | 9978        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000233 | 0.040909 | 0.0000233 | 0.004091 |      |      |
| Story1 | 8316  | 9979        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027428 | 0.003108 | 0.0027428 | 0.000311 | -    | -    |
| Story1 | 8316  | 9979        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000233 | 0.042062 | 0.0000233 | 0.004206 |      |      |
| Story1 | 8431  | 9982        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027446 | 0.002386 | 0.0027446 | 0.000239 | -    | -    |
| Story1 | 8431  | 9982        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000225 | 0.04198  | 0.0000225 | 0.004198 |      |      |
| Story1 | 8432  | 9983        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027422 | 0.002533 | 0.0027422 | 0.000253 | -    | -    |
| Story1 | 8432  | 9983        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000226 | 0.042451 | 0.0000226 | 0.004245 |      |      |
| Story1 | 8433  | 9984        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.02748  | 0.002291 | 0.002748  | 0.000229 | -    | -    |
| Story1 | 8433  | 9984        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000225 | 0.041557 | 0.0000225 | 0.004156 |      |      |
| Story1 | 8777  | 3312        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027603 | 0.001335 | 0.0027603 | 0.000134 | -    | -    |
| Story1 | 8777  | 3312        | SISMOY_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.000226 | 0.036147 | 0.0000226 | 0.003615 |      |      |
| Story1 | 1754  | 1751        | SISMOX_DRE  | LinRespSpec | Max       | 0.027502 | 0.003119 | 0.0027502 | 0.000312 | -    | -    |

Figura 87. Verificación derivas caso 2

| Story  | Label | Unique Name | Output Case | Case Type   | Step Type | Ux       | Uy       | Ux/m     | Uy/m     | C/NC | C/NC |
|--------|-------|-------------|-------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|------|------|
|        |       |             |             |             |           | m        | m        |          |          |      |      |
| Story1 | 35    | 71          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066199 | 0.001753 | 0.00662  | 0.000175 | -    |      |
| Story1 | 35    | 71          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.00016  | 0.022046 | 0.000016 | 0.002205 |      | -    |
| Story1 | 84    | 149         | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066217 | 0.002409 | 0.006622 | 0.000241 | -    |      |
| Story1 | 84    | 149         | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.00016  | 0.027077 | 0.000016 | 0.002708 |      | -    |
| Story1 | 112   | 88          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066044 | 0.000617 | 0.006604 | 6.17E-05 | -    |      |
| Story1 | 112   | 88          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.00018  | 0.025633 | 0.000018 | 0.002563 |      | -    |
| Story1 | 113   | 90          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066045 | 0.00108  | 0.006605 | 0.000108 | -    |      |
| Story1 | 113   | 90          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000181 | 0.025444 | 1.81E-05 | 0.002544 |      | -    |
| Story1 | 144   | 124         | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.06603  | 0.001784 | 0.006603 | 0.000178 | -    |      |
| Story1 | 144   | 124         | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000185 | 0.023967 | 1.85E-05 | 0.002397 |      | -    |
| Story1 | 331   | 196         | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066045 | 0.000358 | 0.006605 | 3.58E-05 | -    |      |
| Story1 | 331   | 196         | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000178 | 0.025467 | 1.78E-05 | 0.002547 |      | -    |
| Story1 | 332   | 197         | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066029 | 0.000896 | 0.006603 | 8.96E-05 | -    |      |
| Story1 | 332   | 197         | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000175 | 0.024152 | 1.75E-05 | 0.002415 |      | -    |
| Story1 | 4     | 5           | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066175 | 0.00155  | 0.006618 | 0.000155 | -    |      |
| Story1 | 4     | 5           | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000214 | 0.021437 | 2.14E-05 | 0.002144 |      | -    |
| Story1 | 5     | 6           | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066195 | 0.002199 | 0.00662  | 0.00022  | -    |      |
| Story1 | 5     | 6           | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000214 | 0.026498 | 2.14E-05 | 0.00265  |      | -    |
| Story1 | 95    | 74          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066022 | 0.001014 | 0.006602 | 0.000101 | -    |      |
| Story1 | 95    | 74          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000174 | 0.023743 | 1.74E-05 | 0.002374 |      | -    |
| Story1 | 96    | 76          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066027 | 0.00233  | 0.006603 | 0.000233 | -    |      |
| Story1 | 96    | 76          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000168 | 0.021874 | 1.68E-05 | 0.002187 |      | -    |
| Story1 | 97    | 78          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.06604  | 0.003438 | 0.006604 | 0.000344 | -    |      |
| Story1 | 97    | 78          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000165 | 0.020489 | 1.65E-05 | 0.002049 |      | -    |
| Story1 | 99    | 80          | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.066082 | 0.002161 | 0.006608 | 0.000216 | -    |      |
| Story1 | 99    | 80          | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000163 | 0.0204   | 1.63E-05 | 0.00204  |      | -    |

Figura 88. Verificación derivas caso 3

| Story  | Label | Unique Name | Output Case | Case Type   | Step Type | Ux       | Uy       | Ux/m     | Uy/m     | C/NC | C/NC |
|--------|-------|-------------|-------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|------|------|
|        |       |             |             |             |           | m        | m        |          |          |      |      |
| Story1 | 8316  | 9979        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.012618 | 0.00259  | 0.001262 | 0.000259 | -    |      |
| Story1 | 8316  | 9979        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000763 | 0.029798 | 7.63E-05 | 0.00298  |      | -    |
| Story1 | 8431  | 9982        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.012624 | 0.002376 | 0.001262 | 0.000238 | -    |      |
| Story1 | 8431  | 9982        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000752 | 0.029927 | 7.52E-05 | 0.002993 |      | -    |
| Story1 | 8432  | 9983        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.01262  | 0.002478 | 0.001262 | 0.000248 | -    |      |
| Story1 | 8432  | 9983        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000752 | 0.031054 | 7.52E-05 | 0.003105 |      | -    |
| Story1 | 8433  | 9984        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.012634 | 0.002341 | 0.001263 | 0.000234 | -    |      |
| Story1 | 8433  | 9984        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000753 | 0.029252 | 7.53E-05 | 0.002925 |      | -    |
| Story1 | 8777  | 3312        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.012657 | 0.00167  | 0.001266 | 0.000167 | -    |      |
| Story1 | 8777  | 3312        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000757 | 0.026583 | 7.57E-05 | 0.002658 |      | -    |
| Story1 | 1754  | 1751        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.012679 | 0.002974 | 0.001268 | 0.000297 | -    |      |
| Story1 | 1754  | 1751        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000768 | 0.033373 | 7.68E-05 | 0.003337 |      | -    |
| Story1 | 1738  | 1750        | SISMOX_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.012699 | 0.001567 | 0.00127  | 0.000157 | -    |      |
| Story1 | 1738  | 1750        | SISMOY_DREF | LinRespSpec | Max       | 0.000754 | 0.021446 | 7.54E-05 | 0.002145 |      | -    |

Figura 89. Verificación derivas caso 3

## J. Chequeo desplazamientos de viento

### Chequeo de desplazamientos por viento (Primera iteración):

Desplazamiento horizontal nominal elástico del piso:

$$\delta_{wk} = 0.75 \cdot \delta_k$$

Donde:  $\delta_k$ : desplazamiento del piso k al aplicar la combinación de carga de viento CR9a

Deriva máxima por viento:

Altura del piso:

$$\Delta := \frac{0.004}{I_c} = 0.004$$

$$h_o := 10 \text{ m}$$

Viento en X: (CR9a) CR9a 0.9M+0.9SC+1.3WY

$$\delta_{k_x} := 0.013856 \text{ m} \quad (\text{Del modelo en ETABS})$$

$$\delta_{wk_x} := 0.75 \cdot \delta_{k_x} = 1.039 \text{ cm}$$

$$\text{Deriva en sentido x: } \Delta_x := \frac{\delta_{wk_x}}{h_o} = 0.001$$

$$DC_x := \frac{\Delta_x}{\Delta} = 0.26$$

Viento en Y: CR8 1.2M+V+1.2SC+1.3Wx

$$\delta_{k_y} := 0.094768 \text{ m} \quad (\text{Del modelo en ETABS})$$

$$\delta_{wk_y} := 0.75 \cdot \delta_{k_y} = 7.108 \text{ cm}$$

Deriva en sentido y:

$$\Delta_y := \frac{\delta_{wk_y}}{h_o} = 0.007$$

$$DC_y := \frac{\Delta_y}{\Delta} = 1.777$$

Figura 90. Desplazamiento de viento caso 1

### Chequeo de desplazamientos por viento (Primera iteración):

Desplazamiento horizontal nominal elástico del piso:

$$\delta_{wk} = 0.75 \cdot \delta_k$$

Donde:  $\delta_k$ : desplazamiento del piso k al aplicar la combinación de carga de viento CR9a

Deriva máxima por viento:

Altura del piso:

$$\Delta := \frac{0.004}{I_c} = 0.004$$

$$h_o := 10 \text{ m}$$

Viento en X: (CR9a) CR9a 0.9M+0.9SC+1.3WY

$$\delta_{k_x} := 0.013856 \text{ m} \quad (\text{Del modelo en ETABS})$$

$$\delta_{wk_x} := 0.75 \cdot \delta_{k_x} = 1.039 \text{ cm}$$

Deriva en sentido x:  $\Delta_x := \frac{\delta_{wk_x}}{h_o} = 0.001$

$$DC_x := \frac{\Delta_x}{\Delta} = 0.26$$

Viento en Y: CR8 1.2M+V+1.2SC+1.3Wx

$$\delta_{k_y} := 0.094768 \text{ m} \quad (\text{Del modelo en ETABS})$$

$$\delta_{wk_y} := 0.75 \cdot \delta_{k_y} = 7.108 \text{ cm}$$

Deriva en sentido y:

$$\Delta_y := \frac{\delta_{wk_y}}{h_o} = 0.007$$

$$DC_y := \frac{\Delta_y}{\Delta} = 1.777$$

Figura 91. Desplazamiento de viento caso 2

### Chequeo de desplazamientos por viento (Primera iteración):

Desplazamiento horizontal nominal elástico del piso:

$$\delta_{wk} = 0.75 \cdot \delta_k$$

Donde:  $\delta_k$ : desplazamiento del piso k al aplicar la combinación de carga de viento CR9a

Deriva máxima por viento:

Altura del piso:

$$\Delta := \frac{0.004}{I_c} = 0.004$$

$$h_o := 10 \text{ m}$$

Viento en X: (CR8) CR8 1.2M+V+1.2SC+1.3Wx

$$\delta_{k_x} := 0.037802 \text{ m} \quad (\text{Del modelo en ETABS})$$

$$\delta_{wk_x} := 0.75 \cdot \delta_{k_x} = 2.835 \text{ cm}$$

Deriva en sentido x:  $\Delta_x := \frac{\delta_{wk_x}}{h_o} = 0.003$

$$DC_x := \frac{\Delta_x}{\Delta} = 0.709$$

Viento en Y: CR8 1.2M+V+1.2SC+1.3Wx

$$\delta_{k_y} := 0.094768 \text{ m} \quad (\text{Del modelo en ETABS})$$

$$\delta_{wk_y} := 0.75 \cdot \delta_{k_y} = 7.108 \text{ cm}$$

Deriva en sentido y:

$$\Delta_y := \frac{\delta_{wk_y}}{h_o} = 0.007$$

$$DC_y := \frac{\Delta_y}{\Delta} = 1.777$$

Figura 92. Desplazamiento de viento caso 3

## K. Volteo

**CASO 1 en x**

| Nivel   | Hi    | Wi    | Cxy  | Vb    | Fx    |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|
| NIVEL 8 | 10.00 | 0.00  | 0.00 | 82.22 | 0.00  |
| NIVEL 7 | 8.75  | 56.86 | 0.30 | 82.22 | 24.28 |
| NIVEL 6 | 7.50  | 56.86 | 0.25 | 82.22 | 20.62 |
| NIVEL 5 | 6.25  | 56.86 | 0.21 | 82.22 | 17.00 |
| NIVEL 4 | 5.00  | 56.86 | 0.16 | 82.22 | 13.42 |
| NIVEL 3 | 3.75  | 56.86 | 0.12 | 82.22 | 9.89  |
| NIVEL 2 | 2.50  | 56.86 | 0.08 | 82.22 | 6.43  |
| NIVEL 1 | 1.25  | 0.00  | 0.00 | 82.22 | 0.00  |

Figura 93. Cortante para volteo caso 1 dirección x

**CASO 1 en y**

| Nivel   | Hi    | Wi    | Cxy  | Vb    | Fx    |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|
| NIVEL 8 | 10.00 | 0.00  | 0.00 | 83.91 | 0.00  |
| NIVEL 7 | 8.75  | 56.86 | 0.30 | 83.91 | 24.78 |
| NIVEL 6 | 7.50  | 56.86 | 0.25 | 83.91 | 21.04 |
| NIVEL 5 | 6.25  | 56.86 | 0.21 | 83.91 | 17.34 |
| NIVEL 4 | 5.00  | 56.86 | 0.16 | 83.91 | 13.69 |
| NIVEL 3 | 3.75  | 56.86 | 0.12 | 83.91 | 10.09 |
| NIVEL 2 | 2.50  | 56.86 | 0.08 | 83.91 | 6.57  |
| NIVEL 1 | 1.25  | 0.00  | 0.00 | 83.91 | 0.00  |

Figura 94. Cortante para volteo caso 1 dirección y

**CASO 2 en x**

| Nivel   | Hi    | Wi    | Cxy  | Vb    | Fx    |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|
| NIVEL 8 | 10.00 | 0.00  | 0.00 | 92.45 | 0.00  |
| NIVEL 7 | 8.75  | 56.86 | 0.44 | 92.45 | 40.95 |
| NIVEL 6 | 7.50  | 56.86 | 0.38 | 92.45 | 34.78 |
| NIVEL 5 | 6.25  | 56.86 | 0.31 | 92.45 | 28.67 |
| NIVEL 4 | 5.00  | 0.00  | 0.00 | 92.45 | 0.00  |
| NIVEL 3 | 3.75  | 0.00  | 0.00 | 92.45 | 0.00  |
| NIVEL 2 | 2.50  | 0.00  | 0.00 | 92.45 | 0.00  |
| NIVEL 1 | 1.25  | 0.00  | 0.00 | 92.45 | 0.00  |

Figura 95. Cortante para volteo caso 2 dirección x

**CASO 2 en y**

| Nivel   | Hi    | Wi    | Cxy  | Vb    | Fx    |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|
| NIVEL 8 | 10.00 | 0.00  | 0.00 | 82.94 | 0.00  |
| NIVEL 7 | 8.75  | 56.86 | 0.44 | 82.94 | 36.74 |
| NIVEL 6 | 7.50  | 56.86 | 0.38 | 82.94 | 31.20 |
| NIVEL 5 | 6.25  | 56.86 | 0.31 | 82.94 | 25.72 |
| NIVEL 4 | 5.00  | 0.00  | 0.00 | 82.94 | 0.00  |
| NIVEL 3 | 3.75  | 0.00  | 0.00 | 82.94 | 0.00  |
| NIVEL 2 | 2.50  | 0.00  | 0.00 | 82.94 | 0.00  |
| NIVEL 1 | 1.25  | 0.00  | 0.00 | 82.94 | 0.00  |

Figura 96. Cortante para volteo caso 1 dirección y

| CASO 1  |       | x     |        |
|---------|-------|-------|--------|
| NIVEL 8 | 0.00  | 10.00 | 0.00   |
| NIVEL 7 | 24.28 | 8.75  | 212.44 |
| NIVEL 6 | 20.62 | 7.50  | 154.64 |
| NIVEL 5 | 17.00 | 6.25  | 106.22 |
| NIVEL 4 | 13.42 | 5.00  | 67.08  |
| NIVEL 3 | 9.89  | 3.75  | 37.09  |
| NIVEL 2 | 6.43  | 2.50  | 16.09  |
| NIVEL 1 | 0.00  | 1.25  | 0.00   |

OTM **593.5579** tonfm

Figura 97. OTM caso 1 dirección x

| CASO 1  |       | y     |        |
|---------|-------|-------|--------|
| NIVEL 8 | 0.00  | 10.00 | 0.00   |
| NIVEL 7 | 24.78 | 8.75  | 216.81 |
| NIVEL 6 | 21.04 | 7.50  | 157.82 |
| NIVEL 5 | 17.34 | 6.25  | 108.41 |
| NIVEL 4 | 13.69 | 5.00  | 68.46  |
| NIVEL 3 | 10.09 | 3.75  | 37.85  |
| NIVEL 2 | 6.57  | 2.50  | 16.42  |
| NIVEL 1 | 0.00  | 1.25  | 0.00   |

OTM **605.7582** tonfm

Figura 98. OTM caso 1 dirección y

| CASO 2     |       | x     |                       |
|------------|-------|-------|-----------------------|
| NIVEL 8    | 0.00  | 10.00 | 0.00                  |
| NIVEL 7    | 40.95 | 8.75  | 358.31                |
| NIVEL 6    | 34.78 | 7.50  | 260.83                |
| NIVEL 5    | 28.67 | 6.25  | 179.16                |
| NIVEL 4    | 0.00  | 5.00  | 0.00                  |
| NIVEL 3    | 0.00  | 3.75  | 0.00                  |
| NIVEL 2    | 0.00  | 2.50  | 0.00                  |
| NIVEL 1    | 0.00  | 1.25  | 0.00                  |
| <b>OTM</b> |       |       | <b>798.2958</b> tonfm |

Figura 99. OTM caso 2 dirección x

| CASO 2     |       | y     |                       |
|------------|-------|-------|-----------------------|
| NIVEL 8    | 0.00  | 10.00 | 0.00                  |
| NIVEL 7    | 36.74 | 8.75  | 321.47                |
| NIVEL 6    | 31.20 | 7.50  | 234.01                |
| NIVEL 5    | 25.72 | 6.25  | 160.74                |
| NIVEL 4    | 0.00  | 5.00  | 0.00                  |
| NIVEL 3    | 0.00  | 3.75  | 0.00                  |
| NIVEL 2    | 0.00  | 2.50  | 0.00                  |
| NIVEL 1    | 0.00  | 1.25  | 0.00                  |
| <b>OTM</b> |       |       | <b>716.2147</b> tonfm |

Figura 100. OTM caso 2 dirección y

## L. Torsión

| Story  | Label | Unique | Output       | Case            | Step Type | U <sub>x</sub><br>m | U <sub>y</sub><br>m | U <sub>x</sub> /10 |
|--------|-------|--------|--------------|-----------------|-----------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Story1 | 1     | 2      | SISMOY_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0007              | 0.0363              | 0.0036             |
| Story1 | 2     | 3      | SISMOY_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0007              | 0.0361              | 0.0036             |

Figura 101. Derivas para torsión caso 1 x

| Story  | Label | Unique | Output       | Case            | Step Type | Ux<br>m | Uy<br>m | Uz<br>m |
|--------|-------|--------|--------------|-----------------|-----------|---------|---------|---------|
| Story1 | 2     | 3      | SISMOX_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0985  | 0.0033  | 0.0007  |
| Story1 | 2161  | 2339   | SISMOX_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0473  | 0.0031  | 0.0002  |

*Figura 102.* Derivas para torsión caso 1 y

| Story  | Label | Unique | Output       | Case            | Step Type | Ux<br>m | Uy<br>m | Uz<br>m |
|--------|-------|--------|--------------|-----------------|-----------|---------|---------|---------|
| Story1 | 1     | 2      | SISMOY_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0011  | 0.0395  | 0.0001  |
| Story1 | 3     | 4      | SISMOY_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0011  | 0.0379  | 0.0001  |

*Figura 103.* Derivas para torsión caso 2 y

| Story  | Label | Unique | Output       | Case            | Step Type | Ux<br>m | Uy<br>m | Uz<br>m |
|--------|-------|--------|--------------|-----------------|-----------|---------|---------|---------|
| Story1 | 2     | 3      | SISMOX_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.1774  | 0.0032  | 0.0010  |
| Story1 | 2329  | 2332   | SISMOX_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0340  | 0.0034  | 0.0002  |

*Figura 104.* Derivas para torsión caso 3 x

| Story  | Label | Unique | Output       | Case            | Step Type | Ux<br>m | Uy<br>m | Uz<br>m |
|--------|-------|--------|--------------|-----------------|-----------|---------|---------|---------|
| Story1 | 1     | 2      | SISMOY_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0003  | 0.0373  | 0.0001  |
| Story1 | 2     | 3      | SISMOY_<br>D | LinRespS<br>pec | Max       | 0.0004  | 0.0361  | 0.0001  |

*Figura 105.* Derivas para torsión caso 3 y