



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE MECÁNICA**

**VALIDACIÓN DE JUNTAS EMPERNADAS SOMETIDAS A CARGAS DE  
TORSIÓN, FLEXIÓN Y TENSIÓN MEDIANTE UN SOFTWARE DE DISEÑO  
ESPECIALIZADO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Mecánico

**AUTORES: BRAYAN RIGOBERTO ULCUANGO ESCOLA**

**WILLIAM ALEXANDER ANDRANGO LOACHAMIN**

**TUTOR: LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN**

Quito – Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, William Alexander Andrango Loachamin con documento de identificación N° 1750206201 y Brayan Rigoberto Ulcuango Escola con documento de identificación N° 1725709032 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 2 de mayo del año 2023

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
William Alexander Andrango Loachamin  
1750206201

  
\_\_\_\_\_  
Brayan Rigoberto Ulcuango Escola  
1725709032

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

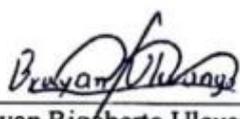
Nosotros, William Alexander Andrango Loachamin con documento de identificación No. 1750206201 y Brayan Rigoberto Ulcuango Escola con documento de identificación No. 1725709032, esperamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la Propuesta Tecnológica: “Validación De Juntas Empernadas Sometidas A Cargas De Torsión, Flexión Y Tensión Mediante Un Software De Diseño Especializado”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de mayo del año 2023

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
William Alexander Andrango Loachamin  
1750206201

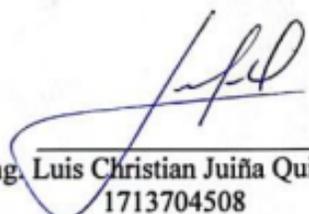
  
\_\_\_\_\_  
Brayan Rigoberto Ulcuango Escola  
1725709032

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Luis Christian Juiña Quilachamín documento de identificación N° 1713704508, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo de mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: VALIDACIÓN DE JUNTAS EMPERNADAS SOMETIDAS A CARGAS DE TORSIÓN, FLEXIÓN Y TENSIÓN MEDIANTE UN SOFTWARE DE DISEÑO ESPECIALIZADO, realizado por William Alexander Andrango Loachamin con documento de identificación N° 1750206201 y por Brayan Rigoberto Ulcuango Escola con documento de identificación N° 1725709032, obtenidos como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de mayo del año 2023

Atentamente,



Ing. Luis Christian Juiña Quilachamín MSc.  
1713704508

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Julián y Estherlia por sus enseñanzas, el apoyo incondicional, el gran esfuerzo y dedicación que han puesto en mi formación académica y en muchos aspectos a lo largo de mi vida. A mi hermana Alisson que a pesar de que se encuentre en otro país siempre me estará apoyando y dando fuerzas para cumplir mis metas. Agradecer igual manera a mis familiares tíos más cercanos que apoyan y apoyaran a mi familia en los momentos más difíciles. Y por último quiero agradecerme a mí, por entender y comprender que soy el pilar de mis acciones que siempre puedo ser mejor y que nunca, a pesar de cualquier circunstancia u obstáculo me rendiré y podre encontrar la solución para cualquier problema que me presente la vida enfrentándola con la mejor actitud.

***Brayan***

Dedico mi trabajo y esfuerzo a mis padres que son una parte fundamental en mi vida, a mi madre, por inculcarme valores como respeto y constancia, a mi padre por enseñarme el valer del trabajo. A mi abuelito que siempre estuvo pendiente de mí hasta su último día de vida. A mi hermano Daniel, por enseñarme que no importa los obstáculos de la vida siempre debo seguir adelante. A Isaac por siempre estar conmigo a pesar de los momentos. A Milton y su esposa e hijo, que me ayudan a comprender que es lo más importante es la familia. Dedico este logro igual a Alejandra que siempre estuvo apoyándome a lo largo de mi caminar universitario y por último a Dios que me permite compartir este triunfo con personas que considero más que una familia.

***William***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestros padres por ser un apoyo incondicional en nuestro caminar universitario, siempre inculcando en nosotros buenos valores y estar siempre en los momentos más difíciles de nuestras vidas.

Agradecemos al Magister Luis Juiña Quilachamin y al Magister Luis Fernando Toapanta Ramos por ser un pilar fundamental dentro de nuestras vidas universitarias y compartir sus conocimientos dentro y fuera ámbito académico conjuntos con mis compañeros de clases.

A la Universidad Politécnica Salesiana y a todas las personas que comprenden la Carrera de Mecánica por brindarnos el espacio que fue muy importante para el logro de este triunfo.

Agradecemos a todos los compañeros y amigos más cercanos de la universidad que nos ayudaron a enfrentar la carrera, compartiendo momentos y experiencias que siempre las recordaremos con mucho cariño.

***Brayan y William***

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES .....	1
OBJETIVOS .....	2
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TORRES ESTRUCTURALES, CARGAS Y ACEROS ..	3
1.1.    Diseño estructural .....	3
1.1.1.    Acero como material estructural .....	3
1.1.2.    Acero de alta resistencia .....	3
1.1.3.    Perfiles .....	4
1.2.    Estructuras metálicas.....	5
1.2.1.    Clasificación de estructuras de acero .....	5
1.2.2.    Fallas estructurales .....	7
1.2.3.    Modos de fallas .....	8
1.3.    Cargas de diseño .....	8
1.3.1.    Cargas vivas .....	9
1.3.2.    Cargas muertas .....	9
1.3.3.    Cargas ambientales .....	9
1.3.4.    Cargas sísmicas .....	9
1.4.    Diseño de elementos .....	9
1.4.1.    Carga axial .....	9
1.4.2.    Deformación por carga axial.....	10

1.4.3.	Carga flexionante .....	11
1.4.4.	Deformación por flexión.....	12
1.4.5.	Torsión.....	12
1.4.6.	Torsión en áreas circulares .....	13
1.4.7.	Torsión en secciones rectangulares .....	13
1.4.8.	Flexión y carga axial .....	14
1.5.	Conexiones .....	15
1.5.1.	Conexiones atornilladas.....	15
1.5.2.	Conexiones tipo fricción.....	15
1.5.3.	Conexiones Mixtas .....	15
1.5.4.	Conexiones soldadas .....	16
1.5.5.	Tipos de conexiones y transmisión de esfuerzos. ....	17
1.5.6.	Atornillado .....	18
1.5.7.	Componentes del tornillo.....	18
1.5.8.	Clasificación de los tornillos.....	19
1.5.8.1.	Tornillos comunes: .....	19
1.5.8.2.	Tornillos de alta resistencia: .....	19
1.5.8.3.	Tornillos apretados sin holguras: .....	20
1.5.9.	Dimensiones de los agujeros para tornillos .....	20
1.6.	Uniones.....	21
1.6.1.	Generalidades.....	21
1.6.2.	Tipos de uniones .....	21
1.6.3.	Resistencia de uniones.....	22
<b>CAPÍTULO II.....</b>		<b>24</b>
<b>DESARROLLO METODOLÓGICO.....</b>		<b>24</b>
2.1.	Identificación de estructura .....	24

2.2.	Geometría y dimensionamiento de la torre .....	24
2.3.	Análisis de la torre .....	25
2.3.1.	Cálculo de cargas vivas .....	26
2.3.2.	Cálculo de cargas ambientales .....	27
2.3.3.	Cálculo de cargas muertas .....	33
2.4.	Análisis de conexiones .....	34
2.4.1.	Conexión por montantes .....	35
2.4.2.	Conexión por diagonales .....	40
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>42</b>
<b>DISEÑO Y SIMULACIÓN .....</b>		<b>42</b>
3.1.	Configuración de la torre mediante SAP 2000. ....	42
3.2.	Simulación de conexiones .....	50
3.2.1.	Simulación de montantes .....	50
3.2.2.	Simulación de diagonales .....	58
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>62</b>
<b>RESULTADOS .....</b>		<b>62</b>
4.1.	Validación mediante simulación torre .....	62
4.2.	Validación mediante simulación conexiones .....	67
4.2.1.	Simulación de Montantes .....	67
4.2.2.	Simulación de diagonales .....	69
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>74</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Torre de alta tensión . . . . .	3
<b>Figura 2.</b> Perfiles de acero . . . . .	4
<b>Figura 3.</b> Fuerzas de tracción y compresión . . . . .	10
<b>Figura 4.</b> Esfuerzo de deformación . . . . .	12
<b>Figura 5.</b> Elemento a torsión . . . . .	12
<b>Figura 6.</b> Torsión en elemento rectangular . . . . .	14
<b>Figura 7.</b> Simulación de estructura de acero . . . . .	15
<b>Figura 8.</b> Proceso de soldadura . . . . .	16
<b>Figura 9.</b> Placas traslapadas conectadas por un perno . . . . .	18
<b>Figura 10.</b> Tornillos de cabeza hexagonal . . . . .	19
<b>Figura 11.</b> Tornillo de alta resistencia . . . . .	20
<b>Figura 12.</b> Elementos a tracción . . . . .	22
<b>Figura 13.</b> Perno sometido a cargas de corte . . . . .	23
<b>Figura 14.</b> Resistencia al aplastamiento . . . . .	23
<b>Figura 15.</b> Torre auto soportada. . . . .	24
<b>Figura 16.</b> Torre de telecomunicaciones. . . . .	26
<b>Figura 17.</b> Tramos de la torre. . . . .	29
<b>Figura 18.</b> Verificación de resistencias. a) por corte y b) por aplastamiento. . . . .	35
<b>Figura 19.</b> Diagrama de cuerpo libre. . . . .	36
<b>Figura 20.</b> a) Vista de planta b) Vista isométrica. . . . .	42
<b>Figura 21.</b> Definición de cargas. . . . .	43
<b>Figura 22.</b> Configuración de cargas de viento. . . . .	44
<b>Figura 23.</b> Tipo de caso en las cargas de viento. . . . .	45
<b>Figura 24.</b> Tipo de apoyo. . . . .	45
<b>Figura 25.</b> Cargas vivas por 9 antenas tipo RF. . . . .	46
<b>Figura 26.</b> Cargas vivas por 6 antenas tipo RF . . . . .	46
<b>Figura 27.</b> Cargas vivas por 6 antenas tipo MW. . . . .	47
<b>Figura 28.</b> Carga distribuida de la escalera y cables. . . . .	47
<b>Figura 29.</b> Condiciones de momento. . . . .	48
<b>Figura 30.</b> Condiciones de articulación separada. . . . .	48
<b>Figura 31.</b> Configuración de perfiles. . . . .	49

<b>Figura 32.</b> Iteraciones del software hasta ajustar el perfil. ....	49
<b>Figura 33.</b> Configuración montante superior. ....	50
<b>Figura 34.</b> Configuración diagonal izquierda superior.....	51
<b>Figura 35.</b> Configuración diagonal izquierda inferior.....	51
<b>Figura 36.</b> Configuración montante inferior. ....	52
<b>Figura 37.</b> Configuración diagonal derecha inferior. ....	52
<b>Figura 38.</b> Configuración diagonal derecha superior. ....	53
<b>Figura 39.</b> Cargas de cada elemento.....	53
<b>Figura 40.</b> Conexión SPL1.....	54
<b>Figura 41.</b> Conexión SPL2.....	54
<b>Figura 42.</b> Unión alma del elemento D3 con la placa existente SPL1. ....	55
<b>Figura 43.</b> Unión entre el ala inferior del elemento D1 con la placa existente SPL1. ....	55
<b>Figura 44.</b> Unión entre el ala inferior del elemento D4 y la placa existente SPL2. ....	56
<b>Figura 45.</b> Configuración de la Norma. ....	56
<b>Figura 46.</b> Geometría de elementos.....	57
<b>Figura 47.</b> Materiales de cada sección y tornillos. ....	57
<b>Figura 48.</b> Configuración de tipos de perfiles.....	58
<b>Figura 49.</b> Cargas de compresión y tensión.....	59
<b>Figura 50.</b> Configuración de conexión. ....	59
<b>Figura 51.</b> Edición de conexiones, dimensionamiento de placa y pernos. ....	60
<b>Figura 52.</b> Diseño de conexión.....	61
<b>Figura 53.</b> Reacciones.....	62
<b>Figura 54.</b> Punto de desplazamiento más alto.....	63
<b>Figura 55.</b> Escala de la ratio de cada elemento, ....	64
<b>Figura 56.</b> Unión de montante y diagonales. ....	65
<b>Figura 57.</b> Unión de diagonales ....	66
<b>Figura 58.</b> Conexiones montantes y diagonales.....	66
<b>Figura 59.</b> Resumen de análisis.....	67
<b>Figura 60.</b> Resultado de tensión de contacto ....	68
<b>Figura 61.</b> Resultados de tensión equivalente.....	68
<b>Figura 62.</b> Deformación plástica. ....	68
<b>Figura 63.</b> Resistencia al aplastamiento, de los pernos por tracción y a cortante.....	69

<b>Figura 64.</b> Solicitaciones de cargas. ....	69
<b>Figura 65.</b> Chequeo de consideraciones geométricas.....	70
<b>Figura 66.</b> Verificación de diseño. ....	70

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones para agujeros en milímetros.....	20
<b>Tabla 2.</b> Valores de las constantes,.....	25
<b>Tabla 3.</b> Longitudes y áreas totales del tramo y área sólida, .....	29
<b>Tabla 4.</b> Coeficiente de arrastre para torres de sección cuadrada, .....	30
<b>Tabla 5.</b> Coeficiente de arrastre para torres de sección cuadrada, .....	33
<b>Tabla 6.</b> Torque para tornillería según el diámetro nominal,.....	34
<b>Tabla 7.</b> Reacciones de la torre, .....	63
<b>Tabla 8.</b> Reacciones de la torre, .....	64
<b>Tabla 9.</b> Perfiles y esfuerzos, .....	64
<b>Tabla 10.</b> Resultados de esfuerzos,.....	70
<b>Tabla 11.</b> Resultados de esfuerzos,.....	70

## RESUMEN

El trabajo de titulación “Validación de juntas empernadas sometidas a cargas de tensión, flexión y tensión mediante un software de diseño especializado”, permite el estudio del diseño y la simulación de una torre de telecomunicaciones, estableciendo todas las condiciones como cargas, vivas, muertas entre otras, también se debe tomar en cuenta el peso de la estructura y características del material lo cual permite introducir los parámetros dentro del software.

La demostración de conceptos básicos de estructuras metálicas y llegar a establecer cálculos analíticos, tomando en cuenta normas como la ASTM de perfiles y pernos, al igual que las cargas como antenas, se obtendrá datos válidos para las cargas y esfuerzos, para poder cotejarlos mediante un programa de simulación el cual permite establecer parámetros y desarrollar una muestra de conexión idéntica.

Los valores obtenidos del programa conjuntamente con los valores analíticos se introducen en el software especializado para desarrollar conexiones similares, para obtener las ratios, en este caso de dos conexiones atornilladas, como la conexión montante-montante y montante diagonal.

Los resultados establecieron que las ratios de las dos conexiones están relacionadas a los valores que se mostraron en los programas de diseño y simulación, lo cual nos permite establecer un porcentaje de error, lo cual se obtuvo un porcentaje de 8%. Pero uno de los limitantes son los tipos de uniones, ya que para poder establecer diferentes conexiones el programa no los reconoce y muestra una cantidad limitada de uniones.

En conclusión, se establece la confiabilidad del software de diseño especializado, para conexiones apernadas, sometidas a distintas cargas axiales, tanto para el empleo académico como para un ámbito laboral.

**Palabras claves:** Análisis numérico, Conexión atornillada, Deformación, Pernos, Sección de viga, Unión rígida

## ABSTRACT

The following degree work "Validation of bolted joints subjected to tension, bending and tension loads by means of a specialized design software", allows the study of the design and simulation of a telecommunications tower, establishing all the conditions such as loads, live, dead among others, also the weight of the structure and characteristics of the material must be taken into account which allows to introduce the parameters within the software.

The objective of the study is to demonstrate basic concepts of metallic structures and to establish analytical calculations, taking into account standards such as ASTM for profiles and bolts, as well as loads such as antennas. Valid data for loads and stresses will be obtained in order to compare them by means of a simulation program which allows establishing parameters and developing an identical connection sample.

The values obtained from the program together with the analytical values are entered into the specialized software to develop similar connections, in order to obtain the ratios, in this case of two bolted connections, such as the mullion-mullion and diagonal-mullion connection.

The results established that the ratios of the two connections are related to the values that the design and simulation programs showed us, which allows us to establish a percentage of error, which we obtained a percentage of 8%. But one of the limitations are the types of connections, since in order to establish different connections the program does not recognize them and shows a limited number of connections.

In conclusion, the reliability of the specialized design software is established, but only for study methods, and for the labor field its use is limited or not very significant.

**Keywords:** Numerical analysis, Bolted connection, Deformation, Bolts, Beam section, Rigid connection

## **INTRODUCCIÓN**

En el ámbito de la ingeniería Mecánica, el estudio de las estructuras metálicas es muy importante ya que prácticamente en cualquier lugar se puede ubicar una armadura y dar a lugar al análisis estructural, donde ese puede indagar temas como, análisis de cargas, tipos de conexiones estructurales, materiales utilizados, etc.

Este trabajo de investigación muestra el diseño y simulación de una estructura metálica, donde su mayor virtud son las conexiones apernadas, para este caso una torre de distribución eléctrica, que esta sometidas a diferentes tipos de fuerzas, dimensionando la estructura obteniendo las cargas y los tipos de perfil a utilizar, realizando los cálculos analíticos los cuales muestran muchas condiciones que se debe tomar en cuenta para la simulación, este se realiza en un software especializado (RAM Connection), donde se puede determinar un sin número de conexiones, aplicando parámetros establecidos de una manera correcta y verificando perfiles. Finalmente, comparar los datos obtenidos por el programa y verificar la veracidad de los mismo en relación con los cálculos analíticos.

La validación de este tipo de juntas es de mucha importancia porque abre la posibilidad de utilizar muchos programas de simulación, siempre y cuando se pueda demostrar la confiabilidad de este, de una manera simple, como es el objetivo de esta investigación.

## **ANTECEDENTES**

Para el estudio de las estructuras, existen un sin número de programas los cuales permiten desarrollar simulaciones, asignar elementos y obtener resultados detallados de las fuerzas que influyen en las estructuras; y todos estos aplicados dentro de campo de la ingeniería, como ejemplo analizar los efectos del viento, las cargas de las armaduras, los pesos que actúan dentro de la estructura entre otros.

La demanda de programas completos que permitan un mejor entendimiento del análisis estructural a la ahora del diseño y desarrollo de proyectos es una herramienta la cual debe ser empleada para optimizar el tiempo, los recursos, y tener un control sobre varios aspectos de cualquier proyecto. Por lo cual encontrar un software amigable que pueda cumplir con todas las especificaciones, normas y materiales; radica en gran importancia a lo largo del desarrollo

de cualquier proyecto, presente hasta el final del mismo en diseño y desarrollo, obteniendo resultados acordes a lo que se pretende construir.

Este tipo de programas ganan gran campo en el estudio de la mecánica, los cuales muestran diferentes tipos de interfaz al igual que los diferentes métodos de cálculos, donde se debe elegir de acuerdo con los estudios a realizarse.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Validar juntas empernadas sometidas a cargas axiales, torsional y flexional mediante un software de diseño especializado.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar una estructura de conexiones de tipo empernada.
- Diseñar un sistema de conexiones empernadas en un software especializado.
- Evaluar los componentes de la estructura con cargas combinadas.
- Analizar el componente estructural a través de un software especializado.
- Validar los resultados obtenidos a partir de los datos adquiridos mediante un software especializado en conjunto de los valores analíticos.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TORRES ESTRUCTURALES, CARGAS Y ACEROS

### 1.1. Diseño estructural

Dentro de la mecánica estructural, el diseño y la simulación forman parte primordial al momento de realizar nuevos proyectos como en Figura 1, que tenga dos aspectos importantes como son la facilidad económica, la cual menciona que los materiales, la fabricación no debe exceder un presupuesto establecido, se puede encontrar con aspectos muy desfavorables para el diseño, y la seguridad que en este caso es muy importante, poder brindar una estructura que cumplan las características establecidas tomando en cuenta los aspectos importantes de los materiales utilizados, cumpliendo el objetivo del diseño estructural.



**Figura 1.** Torre de alta tensión [1].

#### *1.1.1. Acero como material estructural*

Debido a las propiedades del acero y su aleación al carbono hace que sea un elemento perfecto en la construcción de estructuras; fabricados en varios tamaños y formas brindan garantía y costos relativamente bajos. En construcciones son perfectas para trabajar y ensamblar sin cambiar de modo estimable algunas de sus propiedades físicas [1].

#### *1.1.2. Acero de alta resistencia*

Como se mencionó en las propiedades de los aceros estos suelen presentar alta resistencia, pero los de alta resistencia son un tipo de acero que al sufrir más presión que un acero normal mayor al límite regresan a su forma original, su límite elástico se encuentra a 200 y 500 MPa. Este tipo de acero requieren de procesos especiales para su fabricación, en proceso de prensado y tratamiento final que mejora la resistencia encima de un acero.

Estos procesos pueden ser los conocidos como templados o en presencia de aleaciones con boro o fosforo [2].

Los perfiles de acero estructural suelen ser variados y sus usos depende de su tipo o función. Pueden ser de aspectos comerciales, estructurales y como se presentan durante su proceso.

### 1.1.3. Perfiles

Cuando se considera una armadura, los elementos que están conectados entre sí; radican de gran importancia por sus diferentes formas, aplicando la finalidad a utilizarse y el material que influye de manera directa, considerando como ejemplo una estructura que sean ligeramente resistentes; por ende, existen tipos de perfiles como se observa en la Figura 2 [3].

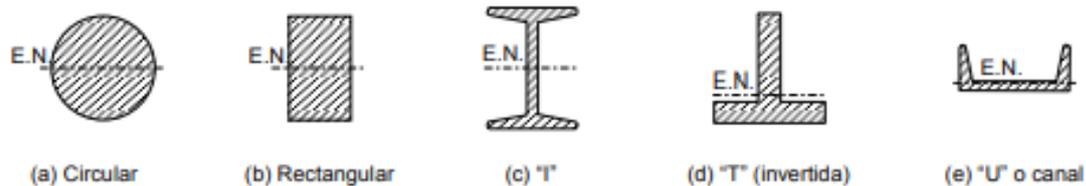


Figura 2. Perfiles de acero [3].

#### 1.1.3.1. Tipos de perfiles de acero

Dentro de las estructuras metálicas los materiales laminados como los perfiles tiene una clasificación, las cuales se dividen entre las cargas a soportar y la parte estética, etc. [4]. A continuación, los perfiles más utilizados estructural y comercialmente:

- **Perfil IPN:** Elementos de conexión donde su principal función es resistir cargas fuertes de las losas o elementos planos ubicados en ellas.
- **Perfil IPE:** Viga de tipo ligero que como principal característica es la reducción del peso en la estructura, dependiendo como se configure el diseño.
- **Canales U:** Perfiles laminados y en forma de u, obtenidos de forma caliente. Muy utilizados en la construcción de puentes fabricación de automóviles y ciertas edificaciones.
- **Solera:** Perfil de tipo comercial con base rectangular, de varios anchos y grosores, de característica altamente dúctil. Su utilización se da en la herrería, material de refuerzo y largueros.

- **Perfil Redondo:** Se asemeja a una barra lisa redonda, de diámetro variado, alta resistencia y dúctil. Muy útil en construcciones comerciales.
- **Perfil Cuadrado:** Perfil liso de forma cuadrada, el más útil en maquinarias y estructuras, altamente uniforme y dúctil. Se utiliza mucho en normas ASTM internacionales.

## **1.2. Estructuras metálicas**

Dentro de la fabricación metálica es imprescindible tener en cuenta, las características estructurales, como es la estabilidad, donde se toma en cuenta la distribución de la armadura con las solicitudes de localización y establecimientos específicos, de la misma manera que con los pilares cimentados con hormigón. El material más utilizado es el acero estructural, por sus condiciones de soportar grandes pesos en relación con su área de contacto, otra característica importante es su resistencia a movimientos por ejemplo del aire y movimientos causados por factores externos.

### ***1.2.1. Clasificación de estructuras de acero***

Las armaduras de acero tienen diferentes tipos, todo depende de cuál sea la finalidad de la estructura, también depende de las cargas que va a soportar, y los materiales. Por ende, se clasifican en:

**1.2.1.1. Pórticos:** Estructura mecánica que está formada por vigas apoyadas en pilares, unidos mediante conexiones rígidas, para proporcionar una armadura segura que no tienda a falla. Los cálculos son regidos por tres ecuaciones enfocadas al momento flector.

**1.2.1.2. Puentes:** Los puentes son estructuras metálicas que en zonas rurales o urbanas representan conexión de pueblos y ciudades. Diseñadas principalmente para soportar fuerzas perpendiculares a la dirección y con el propósito para disponer vida útil prolongada, aunque en la antigüedad representaban una estructura algo más artísticas que con contraste en la actualidad son con mejores materiales, capaz de resistir grandes cargas y trabajos y en general son estructuras enormes [5].

**1.2.1.3. Edificios:** Cuando se refiere a edificios, no tomamos en cuenta elementos estructurales, aunque mayormente estén compuestos de estos, son grandes estructuras que soportan varios tipos de cargas y en la construcción en general. Se componen de varios elementos: cimientos estructura, pilares, entre otros elementos [6].

**1.2.1.4. Torres:** Las estructuras han sido una parte importante en el diseño de armaduras, este tipo de edificios permiten soportar cargas muy livianas como antenas, paneles, luces, etc. [7].

Las torres de acero estructural son consideradas muy resistentes, las cuales se emplean en sin número de casos, por ejemplo, las torres de telecomunicaciones que son determinadas auto soportadas, por lo cual las torres se establecen a partir de su finalidad [8]. Entre la clasificación de las torres se tiene:

- **Torres monopolos:** Torres más simples que conservan la estética de un edificio o lugar y requieren menos espacio, su desventaja radica en tener una buena cimentación para soportar bien las cargas
- **Torres auto soportables:** Estas estructuras comprenden consideraciones especiales, por ejemplo; las fuerzas del viento y cargas símicas; específicamente apoyadas en la tierra. Su propio peso es favorable en estabilidad y rigidez, necesitando menos elementos en las secciones transversales.
- **Torres arriostradas:** Torres que suelen ser ligeras y de bajo consumo de materiales. Soportadas mediante cables en varios puntos de la torre, pueden ser de sección cuadrada o triangular. Pero su mayor inconveniente es ocupar un gran

espacio para el anclaje de la torre al igual de requerir buenos bloques en su cimentación

**1.2.1.5. Estructuras en compresión:** Una estructura que sufre cargas de compresión se refiere a la carga que soporta en sentidos opuestos de un perfil que disponen a deformar y cargar a la estructura por aplastamiento. La estructura en compresión sufrirá de pandeo, lo que provoca en los perfiles el acortamiento en su altura y la progresiva curvatura hasta que produzca un fallo o colapse parte de la estructura [9].

### **1.2.2. Fallas estructurales**

Cuando en cualquier elemento o estructura mecánica, son incapaces de ofrecer una garantía o sufre de alguna ineficiencia, se puede considerar que estos presentan fallas o presentaran fallas que ponen en riesgo varios aspectos como: vidas, costos, funcionamiento de estructura entre varios aspectos más.

En el momento que puede detectar el proceso de una falla en una estructura mecánica, se debe contar con ciertos procedimientos sistemáticos y lógicos que puedan señalar la falla y el modo en las que se presentan en la estructura. La idea es resolver ciertas preguntas: ¿Cómo fallo?, ¿Por qué fallo?, y las causas que provocaron la falla en la estructura. Todas estas preguntas deben ser propuestas en un procedimiento de análisis de fallas [10]. También en el análisis de falla deben tomarse en cuenta aspectos como responsabilidad y acciones correctivas que reduzcan la regularidad de futuras fallas.

**1.2.2.1. Clasificación de fallas estructurales:** En las estructuras mecánicas se pueden detectar los modos de falla que ayudara a definir mejor y actuar según los fallos presentes. A continuación, se presenta su clasificación:

Por su consecuencia.

- **Catastróficas:** Estas se generan por parada o un fallo total en el equipo o estructura, presentan pérdidas económicas, costos en su reparación, y riesgos altos en la vida de los presentes.
- **No Catastróficas:** No presenta fallos en el equipo o estructura; pero si presenta una baja eficiencia, un desgaste, igual manera interfieren al trabajar en la estructura sobre los límites permitidos en el diseño y presentan un riesgo parcial.

Por su tiempo de desarrollo.

- **Súbitas:** Mayormente catastróficas asociadas a fracturas frágiles, dúctiles y deformaciones plásticas, este tipo de fallas se presentan en periodos de tiempo muy cortos que aun con sensores y otros aparatos no permite a la realización de un proceso correctivo.
- **Progresivas:** Estas se presentan por fracturas por fatiga, corrosión bajo esfuerzo, desgaste adhesivo o abrasivo entre otros. Se presentan en un tiempo prolongado, pero esto permite su pronta detección y seguimiento.

Por etapa de evolución.

- **Latente:** Esta se caracteriza cuando un mecanismo en marcha falla, pero no sobrepasa los parámetros de diseño, es más propio de maquinaria que de estructuras.
- **Manifiesta:** Es cuando la falla se manifiesta en el mecanismo y ya presenta fallas sobre los parámetros de diseño.

### 1.2.3. Modos de fallas

Es la representación de como elementos, máquinas y estructuras están presencia de sufrir o sufren fallas, sea por diferentes cargas

Por deformación y vibración: Estas se presentan cuando se someten a una carga que deforman su geometría permanentemente lo que causa la presencia de diferentes fallas. Vibraciones anormales también traen consecuencias en deformaciones, fracturas, desgastes y corrosiones que generan este tipo de fallas.

Por Fractura: Este tipo de fallas se lo pueden denotar por la separación en dos o varios fragmentos de la maquina o estructura. Estas fallas se pueden dar por cualquier tipo de carga que se experimente.

Por desgaste: Se presentan en estructura o mecanismos que sufren ya un tiempo de vida útil.

Por corrosión: Producto de un desgaste por elementos externos y medio ambiente

### 1.3. Cargas de diseño

En términos generales para el diseño de una estructura, se toma en cuenta varios tipos de cargas y como están presentes en la estructura y sus elementos. Para los tipos de cargas

suelen referirse en códigos generales de construcción o diseño por lo que es importante definir como se presentan todas las cargas y las normas que con llevan.

### ***1.3.1. Cargas vivas***

Estas pueden cambiar por localización o en magnitud mayormente provocadas por fuerzas de objetos ubicados temporalmente en la estructura. Suelen tomarse en cuenta para márgenes de protección contra deflexiones o sobrecargas no dimensionadas en el diseño [11].

### ***1.3.2. Cargas muertas***

Consiste en las cargas de varios de los elementos que permanentemente estén sujetos a la estructura. Suelen estimarse la magnitud de las cargas muertas en estructuras según formulas y tamaños de elementos muy similares a la estructura a considerar, pero una vez determinados otros ciertos elementos se los puede considerar a través de tablas que dimensionan sus densidades.

### ***1.3.3. Cargas ambientales***

Estas en términos cortos representan a cargas externas o presentes por fuerza naturales, refiriendo a cargas de: viento, sismos, inundaciones u otras cargas que por diversos factores ambientales puedan relacionarse con la estructura [12].

### ***1.3.4. Cargas sísmicas***

La carga sísmica se presenta como parte de las cargas ambientales, en gran parte de los casos son fuerzas que recorren de manera horizontal ubicadas en el centro de la planta de cada estructura provocadas por un sismo. Su dimensionamiento se encuentra por factores: del terreno, centro másico de una estructura y la intensidad del sismo [13].

## **1.4. Diseño de elementos**

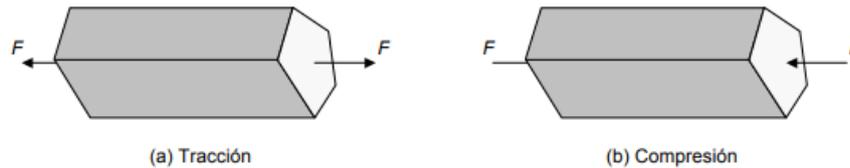
Dentro de la Mecánica, la importancia del diseño sin duda juega un papel primordial al momento de crear o modificar un elemento, tomando en cuenta los principios de utilidad y los objetivos para los cuales se crean dichos elementos.

### ***1.4.1. Carga axial***

Estas cargas se presentan cuando una pieza o elemento de tipo recto es sometido a momentos axiales y ubicadas en el centro de la sección transversal que a su vez se originan

esfuerzos normales uniformes en toda la pieza o elemento [14]. Estos esfuerzos están dados por la siguiente formula:

Donde F representa la fuerza aplicada sobre A en la sección transversal como se aprecia en la Figura 3. El signo depende si es positivo representa que el elemento está sometido a tracción y si en el caso que fuera negativo se habla que el elemento presenta una carga de compresión.



**Figura 3.** Fuerzas de tracción y compresión [14].

Si al realizar un corte en el elemento sea en cualquier sección esta debe presentar bajo ciertas condiciones ideales un estado de distribución uniforme de las fuerzas es decir solo se presentan esfuerzo en una dirección.

#### **1.4.2. Deformación por carga axial**

Esta se presenta cuando el elemento es sometido tracción o a compresión dando como resultado un estado de deformación total. Cuando se somete a un estado de atracción el elemento tiende a alargarse y cuando sufre de estado de compresión el elemento tiende a acortarse [15]. El estado de deformación total está representado por la siguiente formula:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \tag{1}$$

$\delta$ : deformación total

$\varepsilon$ : deformación unitaria

L: longitud inicial del elemento

Al reemplazar esta fórmula se obtiene la fórmula para la deformación total.

$$\delta = \varepsilon L = \frac{S}{E} L = \frac{\pm F}{EA} L \tag{2}$$

$$\delta = \pm \frac{FL}{AE} \quad (3)$$

### 1.4.3. Carga flexionante

Esta carga se produce cuando existe un elemento rectangular en sentido horizontal, se le aplica fuerzas en dirección perpendicular. En el caso de una flexión pura el elemento no presenta cargas transversales. Debido a las cargas el elemento tiende a curvarse dando como resultado que ciertos puntos superiores se alarguen sufriendo de esfuerzos a tracción y puntos inferiores en esfuerzos de compresión y otros puntos no soportando ningún tipo de esfuerzo [16].

Para determinar los máximos esfuerzos de atracción y compresión estos deben cumplir en ser los puntos más alejados al centro del eje del elemento, dando como resultado las siguientes formulas:

$$S_t = \frac{M C_t}{I} \quad y \quad S_c = \frac{M C_c}{I} \quad (4)$$

$S_t$ : esfuerzo máximo de tracción

$S_c$ : esfuerzo máximo de compresión

$C_t$  y  $C_c$ : Distancia desde un plano neutro ubicado en el centro del eje

$M$ : momento flector

$I$ : Momento Rectangular de inercia

Para elementos de con diferentes formas de secciones transversales se presenta la siguiente formula:

$$S = \frac{Mc}{I} = \pm \frac{M}{Z} \quad (5)$$

$S$ : Esfuerzo extremo superior o inferior

$M$ : Momento flector

$Z$ : módulo de sección

Los signos cuando se presenta como positivo es esfuerzo por tracción y si se presenta como negativo es compresión.

Si se presentan cargas transversales sobre el elemento de igual manera aparecen esfuerzos cortantes que son más pequeños que los esfuerzos normales, con la condición de si el elemento es largo. Como se determina que el elemento es largo, esto sería si la longitud es 10 veces más que la altura.

#### 1.4.4. Deformación por flexión

Lo que se denomina deflexión es la cuantificación de la deformación de un elemento y su valor de elasticidad. Cuando el elemento presenta una desviación en algún punto situado en el eje elástico y respecto a la forma inicial es decir si alguna carga, el valor de elasticidad de la viga sería tangente a ese punto considerado. Esta deflexión se mide a la dirección perpendicular al estado elástico inicial. Para el cálculo de la deflexión se debe tener en cuenta ciertos aspectos como: las secciones A y B y la pendiente elástica. Aunque estos cálculos se pueden obtener de varias formas como: métodos de integración, área y momento o por energía [17].

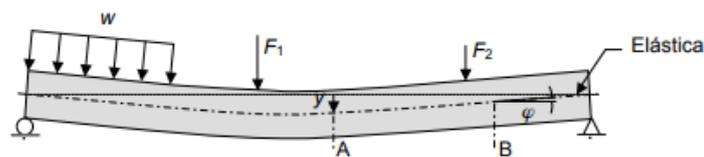


Figura 4. Esfuerzo de deformación [17].

#### 1.4.5. Torsión

Este tipo de cargas se presentan cuando en el elemento actúan dos fuerzas de torsión como en la Figura 5, y presentan momentos cortantes. Estos a comparación de los tipos de carga axial y flexional, la forma influye de manera significativa para sus cálculos [18].

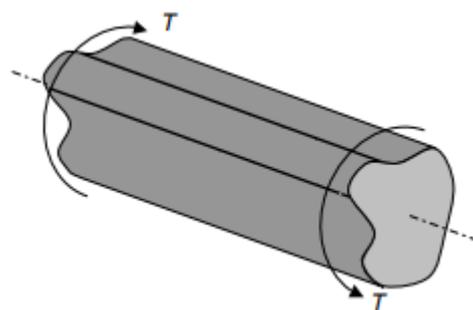


Figura 5. Elemento a torsión [18].

En los elementos más comunes donde se generan cargas por torsión son de tipo circular o rectangular mayormente y estas pueden ser solidas o huecas

#### ***1.4.6. Torsión en áreas circulares***

Este tipo de torsiones se caracterizan por presentarse en secciones circulares, el valor del esfuerzo cortante en cualquier punto es directamente proporcional en la distancia a lo largo del elemento, este eje se lo conoce como eje neutro. Al igual que en flexión los puntos de esfuerzo máximo se presentan en la superficie del elemento. Los pares de torsión determinan su dirección respecto a los esfuerzos cortantes [19].

El esfuerzo máximo se representa por la siguiente formula:

$$Ss = \frac{Tc}{J} = \frac{T}{Z'} \quad (6)$$

Ss: Esfuerzo cortante máximo

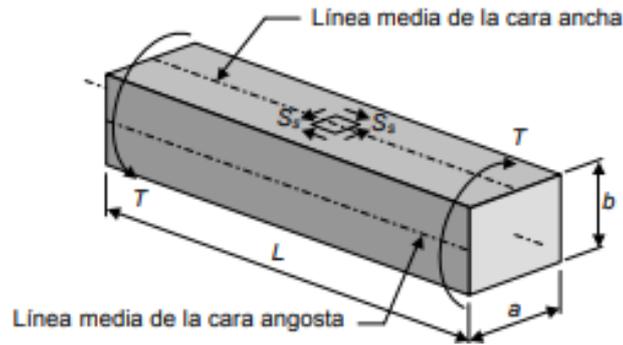
c: Distancia del eje neutro

J: Momento polar de inercia

Z': Modulo polar de inercia

#### ***1.4.7. Torsión en secciones rectangulares***

Aunque en mayor medida las secciones circulares son más utilizadas en la construcción para la resistencia de torsión, las secciones rectangulares también se ocupan para resistencias de torsión, no cumpliendo las mismas fórmulas de secciones circulares. Debido a la naturaleza de las áreas rectangulares la disposición de sus esfuerzos cortantes es más complejo, igual que presentan un esfuerzo valor nulo en la sección y esta va en aumento, directo al punto centro de los lados de su sección. En la Figura 6 se aprecia un elemento rectangular la cual está sometida a dos fuerzas torsionales a sus extremos respecto a sus sentidos opuestos [20].



**Figura 6.** Torsión en elemento rectangular [20].

A comparación de los elementos circulares, las secciones rectangulares no permanecen rectas al momento de someter una carga, es decir afecta su forma. Estos se deforman por la aplicación de los pares de torsión. Como se observa en la siguiente figura

Los esfuerzos cortantes máximos están representados por la siguiente formula:

$$Ss \max = \frac{T}{\alpha ab^2}, \quad (7)$$

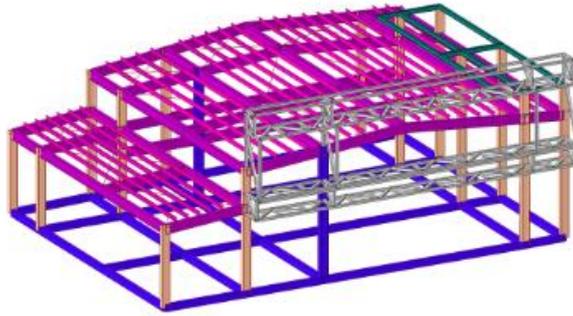
T: Par de torsión en la sección

ab: las longitudes de los lados mayor y menor de la sección transversal

$\alpha$ : se obtiene mediante interpolación de la relación entre las longitudes a y b.

#### **1.4.8. Flexión y carga axial**

Dentro de la mecánica, las estructuras que están sometidas a flexión y carga axial son muy comunes como se observa en la simulación de un galpón en la Figura 7, como por ejemplo en una armadura, las columnas son las que soportan el peso de la estructura y sobre ellos actúan fuerzas de flexión y compresión. En esta parte de la estructura es poco probable que se pueda centrar una carga axial aun en estudios muy avanzados. Inclusive en un edificio las cargas concéntricas no pueden estar perfectamente estacionarias, considerando que puede darse otras fallas, ocasionando cargas de flexión a los costados de la estructura [21].



**Figura 7.** Simulación de estructura de acero [21].

## **1.5. Conexiones**

Anteriormente los métodos para unir dos elementos de acero de una armadura fueron los remaches, pero sin duda en la actualidad el sistema de unión más conocido es mediante torillos y soldadura.

### ***1.5.1. Conexiones atornilladas***

Una de las características más importantes es su fácil montaje, se requiere menos personal especializado a comparación de la soldadura. Lo que permite el ahorro de mano de obra de tiempo y de recursos. Uno de los manuales que se puede utilizar es del AISC que proporciona información de estructuras con uniones atornilladas [22].

### ***1.5.2. Conexiones tipo fricción***

Si los tornillos están tensados por una fuerza mayor, las resistencias entre la superficie de contacto y el desplazamiento generan una carga que es similar a la de fricción.

Las juntas por fricción representan uniones las cuales se ocasionan mediante el aumento de temperatura o mediante la fricción de dos elementos. Esta conexión tiene cargas sometidas a impactos donde la estructura esta arriostrada.

### ***1.5.3. Conexiones Mixtas***

Para establecer una junta mixta se debe tomar en cuenta las características de la estructura y su funcionamiento, donde se toma cada una de las secciones ya que en partes las conexiones son soldadas y en otras predominan las juntas atornilladas, de igual manera están combinadas con materiales como hormigón armado o tiene algún tipo de recubrimiento [23].

#### 1.5.4. Conexiones soldadas

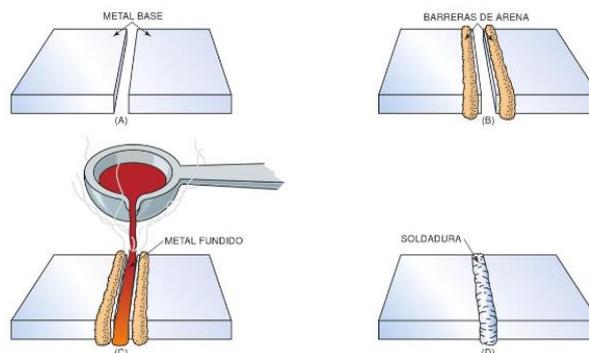
En el mundo estructural las conexiones soldadas son muy importantes y aplicables a las uniones de armaduras, el análisis junto con el diseño de estas conexiones establece casos diferentes donde se toma en consideración las cargas, momentos, esfuerzos, etc. Igualmente, el tipo soldadura como: a tope, filete, ranura, entre otros.

La conexión soldada, tiene como características su implementación, como en cualquier junta soldada su material de aportación ayuda mediante la corriente eléctrica, la cual funde el material y puede sujetar dos o más piezas juntas.

La resistencia de la soldadura tiene como ventaja la capacidad de soportar cargas y esfuerzos altos. Por ejemplo, en estructuras de acero como puentes, armaduras de edificios. Esta resistencia también es capaz de soportar pesos y fuerzas externas como el clima.

La única desventaja es la capacidad del operario de realizar una soldadura de acorde a las necesidades de la estructura, formando así una conexión confiable y duradera [24].

**1.5.4.1. Principio de soldadura:** La soldadura es una fusión de materiales con características idénticas, mediante la elevación de temperatura, el cual permite unir el material al aporte. En la Figura 8, en la sección a) se establecen dos o más piezas a unir, en la sección b) se establece un rango de protección lo que hoy en día se conoce como el revestimiento de los electrodos, en la sección c) se eleva la temperatura del material de aporte y de los elementos a unir para lograr la fusión de los materiales y en la sección d) es la soldadura final [25].



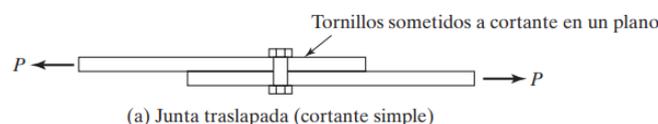
**Figura 8.** Proceso de soldadura [25].

Existen varios tipos de soldadura, con diferentes características y aplicaciones. Los más comunes son:

- **Soldadura por arco:** Es un método muy común que utiliza un arco eléctrico para generar el calor necesario para fundir el metal. Este tipo de soldadura se divide en dos tipos, la soldadura con material revestido (SMAW) y la soldadura realizada por arco sumergido (GMAW o MIG). La soldadura con electrodo revestido se realiza con un electrodo y se evapora para crear el arco eléctrico.
- La soldadura (inmerso en gas) utiliza material no consumible (tungsteno) para generar el arco eléctrico y un gas para proteger los cordones de soldadura de la contaminación. Esta soldadura es muy precisa y se utiliza para unir materiales delgados y para soldaduras en posiciones difíciles.
- **Soldadura MIG:** Es similar a la soldadura TIG, con la diferencia que este aporta un material continuo y juntamente con un gas para proteger un cordón de soldadura de la contaminación es fácil de aprender y utilizar a menudo para soldaduras en áreas de producción masiva.
- **Soldadura por resistencia:** Utiliza la resistencia eléctrica para generar el calor necesario para fundir el material y se utiliza a menudo para unir metales delgados y para soldaduras en áreas de producción masiva.
- **Soldadura por fricción:** Utiliza la fricción entre dos piezas para soldarlas y fundir el material del cual están compuestas. Se utiliza para soldar puntos específicos en una pieza de metal y se utiliza a menudo en áreas de producción masiva de soldadura tiene sus propias ventajas y desventajas y la elección del tipo adecuado dependerá del material a soldar y la posición de la soldadura y el ambiente que se requiere para la calidad de la soldadura [26].

#### 1.5.5. Tipos de conexiones y transmisión de esfuerzos.

Existen algunos tipos de conexiones atornilladas dependiendo la forma en la cual se sobrepone entre sí, en la Figura 9 se observa diferentes uniones de placas de acero en la sección A se muestra una junta traslapada con cargas que ejercen un esfuerzo cortante al plano. En la sección b se muestra las fuerzas de aplastamiento y donde se muestra las direcciones del esfuerzo cortante. La flexión que se produce en las juntas traslapadas se muestra en la sección C.



**Figura 9.** Placas traslapadas conectadas por un perno [27].

### **1.5.6. Atornillado**

Antes de utilizar las conexiones atornilladas los métodos comúnmente utilizados fueron los remaches, sin embargo, crear un método más simple para el ensamblaje y la fabricación, ha provocado que las conexiones atornilladas tengan gran acogida [27].

Para conocer la técnica del atornillado se tiene que conocer antes los diferentes componentes que lo conforman.

### **1.5.7. Componentes del tornillo**

**El tornillo:** Representa el elemento de fijación utilizado en la unión de piezas metálicas de madera o cualquier otro material, básicamente está compuesto de una varilla cilíndrica roscada en espiral, el cual se ajusta en el material previamente roscado

**Perno:** Es un elemento metálico, largo y con cabeza redonda o mayormente hexagonal, que permiten asegurar dos elementos por medio de una tuerca, una chaveta o un remache.

Entre estos elementos a pesar de que cuentan con las mismas partes: cabeza, cuello y rosca, existe una gran diferencia en los usos, mientras el tornillo se ocupa mayormente en agujeros roscados y el perno mediante una tuerca, en la práctica no puede ser una regla general y se los ocupa en distintas situaciones que el trabajo lo amerite.

**Cabeza del tornillo:** Representa la parte superior y en general es la parte más ancha del tornillo. Esta es la que se ocupa para sujetar, la cual generalmente presenta un movimiento giratorio con la ayuda de alguna herramienta, por ejemplo, el destornillador o una llave. Esto pueden tener varias formas y ocupar diferentes usos:

- **Cabeza hexagonal:** Se presentan mayormente en los tornillos hexagonales o llamados pernos, están destinados mayormente a construcción o la industria
- **Cabeza redondeada:** son fáciles de remover, se usan mayormente para fijar elementos o piezas bastante delgadas.
- **Cabeza plana:** se ocupa en la carpintería en general, donde se requiere que la cabeza del tornillo y la superficie de la pieza queden al ras o al mismo nivel.
- **Cabeza Cilíndrica:** se los ocupan mayormente en superficies lisas, donde las fuerzas de apriete sean bajas y se requiera una llave de tipo Allen para colocarlas.

- **Rosca:** Otro aspecto importante en los tornillos es la rosca, que representa el nervio helicoidal, presente alrededor del cuerpo del tornillo; es la parte que más se acopla con la tuerca o los elementos roscados.

#### **1.5.8. Clasificación de los tornillos**

En la industria existen un sin número de tornillos los cuales se clasifican en:

**1.5.8.1. Tornillos comunes:** Estos elementos son designados como A307 según la norma ASTM, los esfuerzos y deformaciones son similares al acero comercial (A36) y su material predominante es el carbono.

Las formas de los tornillos y tuercas son de formas cuadradas y hexagonales los cuales el primer tipo son para disminuir costos y las otras son para mejorar la estética de la apariencia como se muestra en la Figura 10.

Por el diseño que tienen una resistencia menor que a los tornillos de alta resistencia, por ende, se los aplica en armaduras ligeras como plataformas, en uniones de correas, riostras y estructuras pequeñas.



**Figura 10.**Tornillos de cabeza hexagonal [28].

**1.5.8.2. Tornillos de alta resistencia:** Una de las características son sus componentes de fabricación y tratamientos térmicos, para mejorar resistencia a esfuerzos. Según la norma existen dos tipos de denominaciones, tornillos de acero con aleación de carbono con un tratamiento térmico (A325) y tornillos de acero aleado de la misma manera con tratamiento térmico (A490).

Estos elementos fueron creados para estructuras de grandes dimensiones como rascacielos, puentes grandes y colgantes. Las características de estos es superar la resistencia de los tornillos comunes y de los remaches.

Para algunos tipos de estructuras los tornillos de alta resistencia no cumplen con las dimensiones, por ende, según el manual de AISC se pueden utilizar los tornillos A449 y A354, para establecer los parámetros muchos de estos tornillos tienen grabadas las designaciones de norma o tipos en la cabeza de perno como en la Figura 11[28].



**Figura 11.** Tornillo de alta resistencia [28].

**Ventajas:**

1. No existe separación entre los elementos a unir, mediante el apriete de la tuerca las piezas quedan presionadas con una fuerza mayor.
2. La fuerza que ejerce sobre el tornillo queda perpendicularmente lo cual permite que la resistencia actúe sobre el rozamiento lo que somete al tornillo a una carga axial y a compresión en su espiga.
3. El tiempo de montaje y desmontaje se disminuye a comparación de otras uniones como la soldadura o los remaches.

Unas de las características importantes de los tornillos, es la forma del apriete por ende existen tres tipos de actuar de las tuercas.

**1.5.8.3. Tornillos apretados sin holguras:** Estos son los más conocidos ya que se establece que cuando se va a unir dos elementos y estos no deben tener espacio entre sí, el apriete se los realiza con una llave de tuerca. Estos tornillos se utilizan en cualquier campo a excepción de los elementos que requieren fricción o son tornillos que requieren pretensiones.

**1.5.9. Dimensiones de los agujeros para tornillos**

Las dimensiones de agujeros presentan mediante la norma ASTM. Las perforaciones deben ser establecidas con medidas al igual que las no dimensionadas estas deben estar aprobadas por el diseñador, tomando en cuenta la **Tabla 1** que está en milímetros [29].

**Tabla 1.** Dimensiones para agujeros en milímetros [29].

Ø del tornillo	Estándar	Agrandados	Ranura corta (ancho × longitud)	Ranura larga (ancho × longitud)
M16	18	20	18 x 22	18 x 40
M20	22	24	22 x 26	22 x 50
M22	24	28	24 x 30	24 x 55
M24	27[A]	30	27 x 32	27 x 60
M27	30	35	30 x 37	30 x 67
M30	33	38	33 x 40	33 x 75
≥M36	d + 3	d + 8	(d + 3) x (d + 10)	(d + 3) x (2.5 x d)

## **1.6. Uniones**

En las estructuras de acero, las uniones forman parte muy importante dentro de la armadura, por ende, es un parte muy especial, donde se debe tener en cuenta muchas cosas, ya que esta zona puede ser muy resistente y duradera, de lo contrario puede ser un punto de falla o de peligro. En el diseño estructural existe un sin número de uniones que puede existir, dependiendo de los diseños, tipos de proyectos, también pueden tomarse en cuenta el montaje y la fabricación.

### ***1.6.1. Generalidades***

La unión comprende una parte importante para analizar, porque en este punto existen esfuerzos importantes donde se evalúa la tensión y deformación, la cual se debe estudiar experimentalmente considerando métodos numéricos tomando en cuenta los límites de elasticidad del material que comprenden los elementos.

En el análisis numérico se determina los esfuerzos que resiste los elementos, al igual que los métodos y medios de unión como tornillos, remaches, soldadura, etc.

### ***1.6.2. Tipos de uniones***

Para las uniones existen una clasificación respecto a su resistencia y uniones a flexión. Dentro de las uniones por su capacidad de resistir a los esfuerzos existen dos tipos, los rígidos y los semirrígidos.

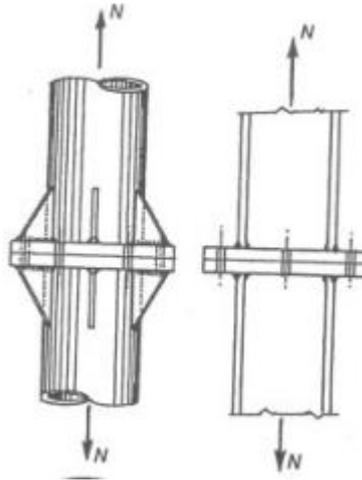
- Uniones rígidas: Es un tipo de unión mecánica, entre uno o dos elementos, de modo que su movimiento está restringido. Estas uniones se usan para transmitir esfuerzos de carga entre elementos.
- Uniones semirrígidas: La característica principal de esas uniones es como tipo articulación, la cual permite un grado de movimiento, dependiendo las fuerzas que actúan en la parte móvil. Algunos elementos son las bridas, uniones articuladas y de cardan.

### 1.6.3. Resistencia de uniones

**1.6.3.1. Resistencia a la tracción:** Presente en uniones que están sometidas a fuerzas de tipo lineal, estos pueden ser conexiones por: medio de soldadura, atornilladas o por remaches.

Mediante el estudio se determinó que las uniones soldadas son las más resistentes, debido a que su conexión comprende de fusionar los materiales y esta presenta una alta resistencia al fallo, a comparación de las uniones apernadas.

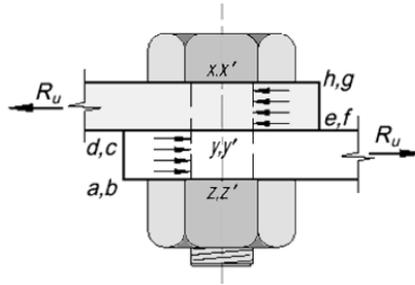
El método para utilizar conexiones apernadas que pueda permitir la resistencia a la tracción es realizar una modificación a los extremos de las uniones como se observa en la Figura 12.



**Figura 12.** Elementos a tracción [29].

**1.6.3.2. Resistencia al corte:** Capacidad de los elementos para resistir las fuerzas de corte aplicada en dirección perpendicular al sentido del perno. La fuerza mencionada puede deformar o cortar un elemento. Esta consideración es muy importante para establecer una conexión la cual pueda resistir al fallo.

En la Figura 13, existen dos elementos conectados por medio de un tornillo sujetos por un perno ajustado, en este ejercen fuerzas en sentido de los elementos transversales a las uniones.



**Figura 13.** Perno sometido a cargas de corte [29].

### 1.6.3.3. Resistencia al aplastamiento

Este tipo de resistencia tiende a comprimir las piezas como en la Figura 14. Dentro de las estructuras que mantienen este tipo de uniones sobresalen las edificaciones, ya que, dentro de estas armaduras, las bases comprenden de vigas grandes que puedan soportar cargas muertas de la edificación, y como va incrementando su altura también deben incrementar vigas que puedan ser más delgadas pero que soporten las mismas cargas.

Al igual que las resistencias anteriores existe diferentes métodos de unión, como las soldadas y las atornillas, las dos tiene la misma importancia, por su facilidad de montaje o por su fabricación.



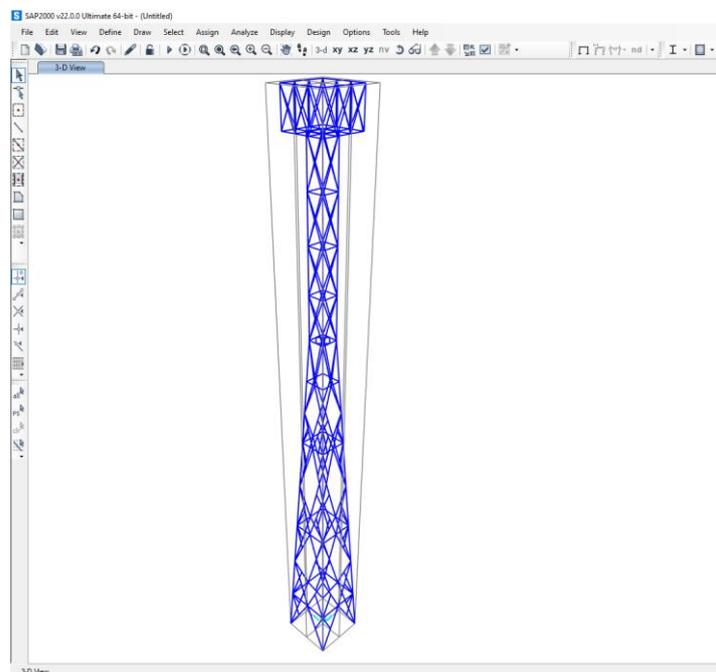
**Figura 14.** Resistencia al aplastamiento [29].

## CAPÍTULO II

### DESARROLLO METODOLÓGICO

#### 2.1. Identificación de estructura

Existen diferentes torres de telecomunicaciones como son las torres atirantadas, torres monopolo y torres auto soportadas. La torre que se desarrolla en este proyecto es la auto soportada como se indica en la Figura 15, debido a que son las más utilizadas en zonas urbanas o rurales, además tiene la capacidad de soportar varias antenas de grandes superficies. Por lo tanto, la torre es de sección cuadrada con una altura de 20 m, base tronco piramidal y parte superior constante [30].



**Figura 15.** Torre auto soportada.

#### 2.2. Geometría y dimensionamiento de la torre

La torre que se establece es de sección cuadrada, parte superior constante y base piramidal, para dimensionar la base se emplea una relación base/altura de 1/10, si la altura es de 20 m, por lo tanto, la base es de 2 m. Cada tramo de la torre está constituido por montantes, horizontales, diagonal principal y diagonal secundario, la altura de cada tramo se determina según la escala de turbulencia, en la Tabla 2 se indica los valores de las constantes.

**Tabla 2.** Valores de las constantes.

<b>Categoría</b>	<b>Zmin[m]</b>	<b><math>\alpha</math></b>
<b>1</b>	1	0.44
<b>2</b>	2	0.52
<b>3</b>	5	0.61
<b>4</b>	10	0.67

Donde la altura de la torre ( $Z_s$ ) es de 20 m, se evalúa con la categoría 2 donde la constante ( $\alpha$ ) es 0.52, mediante la fórmula planteada

$$L_{Zs} = 300 \cdot \left(\frac{Z_s}{200}\right)^\alpha \quad (8)$$

$$L_{Zs} = 300 \cdot \left(\frac{20}{200}\right)^{0.52}$$

$$L_{Zs} = 90.59 \text{ m}$$

$$L_{Zs} \geq Z \text{ min}$$

Por lo tanto, si cumple y la longitud mínima por tramo debe ser de 2 m, se considera que la longitud de la parte superior debe ser el 30 % de la altura, entonces la longitud es de 6 m siendo así, la base es la relación base/longitud constante de 1/10, por eso la base superior de la torre es de 0.6 m.

### **2.3. Análisis de la torre**

Se procede a calcular las cargas muertas, vivas, viento y sismo. En primer lugar, se debe saber la ubicación de la torre, en la Figura 16 se indica la geometría de la torre de telecomunicaciones, situada a 2850 m sobre el nivel del mar, la temperatura media del lugar es 19 °C, la velocidad de viento 10 km/h, el factor topográfico 1.2 y la categoría del terreno es tipo 3.



**Figura 16.** Torre de telecomunicaciones [32].

### 2.3.1. Cálculo de cargas vivas

La torre va a soportar 15 antenas tipo RF de 2.70 m de largo, 0.35 m de ancho y con espesor de 0.16 m, las cuales 9 están ubicadas a 20 m de altura y 6 antenas a 14 m de altura. También hay 2 antenas tipo MW ubicadas a 10 m de altura. Según las combinaciones de carga por el método ASD, se considera que la gravedad ( $g$ ) es  $9.81 \frac{m}{s^2}$ . Esta carga se encuentra ubicada al final del quinto tramo donde el peso de cada antena RF ( $P_{RF1}$ ) es 40.5 kg y el número de elementos ( $n$ ) es 9 antenas.

$$D_{RF1} = P_{RF} \cdot n \cdot g \quad (9)$$

$$D_{RF1} = 40.5 \text{ kg} \cdot 9 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$D_{RF1} = 3575.75 \text{ N}$$

A continuación, se ubica las 6 antenas restantes de tipo RF al iniciar el 5to tramo, cada una pesa ( $P_{RF2}$ ) 40.5 kg.

$$D_{RF1} = P_{RF} \cdot n \cdot g$$

$$D_{RF1} = 40.5 \text{ kg} \cdot 6 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$D_{RF1} = 2383.83 \text{ N}$$

Luego se calcula la carga por las antenas tipo MW, ubicadas al finalizar el tercer tramo de la torre, cuyo peso ( $P_{MW}$ ) es de 100 kg y el número de elementos ( $n$ ) es 2 antenas.

$$D_{RF1} = P_{RF} \cdot n \cdot g$$

$$D_{RF1} = 100 \text{ kg} \cdot 2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$D_{RF1} = 1962 \text{ N}$$

Se considera una escalera de acceso de acero A36 ( $D_{Escalera}$ ) compuesta por 2 perfiles ( $P_L$ ) tipo L de 3” y 1/4”, una barra lisa ( $P_{barra}$ ) de 3/4” y una línea de vida ( $P_{Linea}$ ) de 3/8”, cuya carga es de 7.29, 2.24 y 0.56 kg/m respectivamente.

$$D_{Escalera} = P_L \cdot n \cdot g + P_{barra} \cdot n \cdot g + P_{Linea} \cdot n \cdot g \quad (10)$$

$$D_{RF1} = 7.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 2.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 1 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 0.56 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 1 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$D_{RF1} = 170.5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Los cables de alimentación de 24.5 mm de diámetro ( $D_{cables}$ ), está compuesta por 15 cables cada uno tiene una carga ( $P_{cables}$ ) de 0.76 kg/m.

$$D_{cables} = P_{cables} \cdot n \cdot g \quad (11)$$

$$D_{cables} = 0.76 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 15 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$D_{cables} = 111.8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Se debe señalar que no se suman estas cargas ya que, se encuentran divididas en cada tramo de la torre y cada punto.

### 2.3.2. Cálculo de cargas ambientales

Las cargas ambientales a calcularse son las de viento, no se calcula las de sismo por el manual AISC considera que la estructuras pequeñas y livianas no es necesario determinarlas, por lo tanto, se procede a calcular las cargas de viento por cada tramo, se considera que la velocidad máxima promedio del viento en Quito es de 18.36 km/h, cuya dirección predominante es el Norte, y el factor de amplificación dinámica ( $F_{AD}$ ) para torres de celosía auto soportadas es de 1.2935 adimensional. La fuerza equivalente ( $F_{eq}$ ) se determina para los 5 tramos, donde interviene la multiplicación de la presión del viento

( $q_z$ ), coeficiente de arrastre ( $C_{at}$ ), área solida del tramo ( $A_{at}$ ) y el factor de amplificación dinámica, como indica la fórmula [31].

$$F_{eq} = q_z \cdot C_{at} \cdot A_{at} \cdot F_{AD} \quad (12)$$

La presión del viento se determina con el coeficiente de forma ( $C_s$ ), si es de forma cilíndrica o plana su valor es de 1 y 1.3 respectivamente, también interviene la velocidad del viento ( $V_{viento}$ ).

$$q_z = 0.002558 \cdot C_s \cdot V_{viento}^2 \quad (13)$$

$$V_{viento} = 18.36 \frac{km}{h}$$

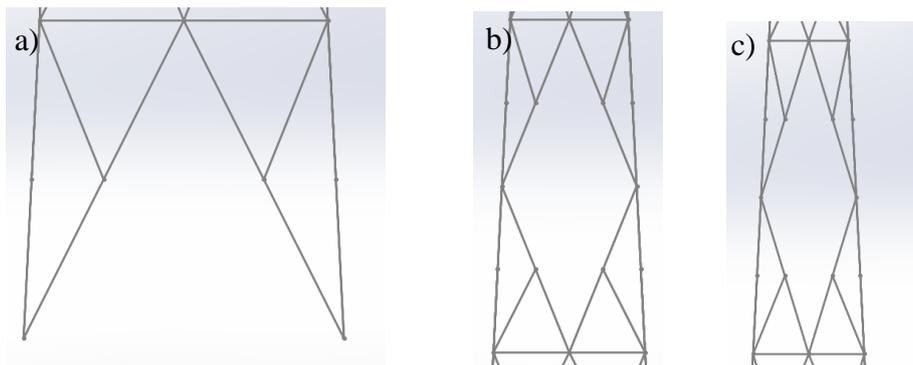
$$V_{viento} = 11.41 \frac{millas}{h}$$

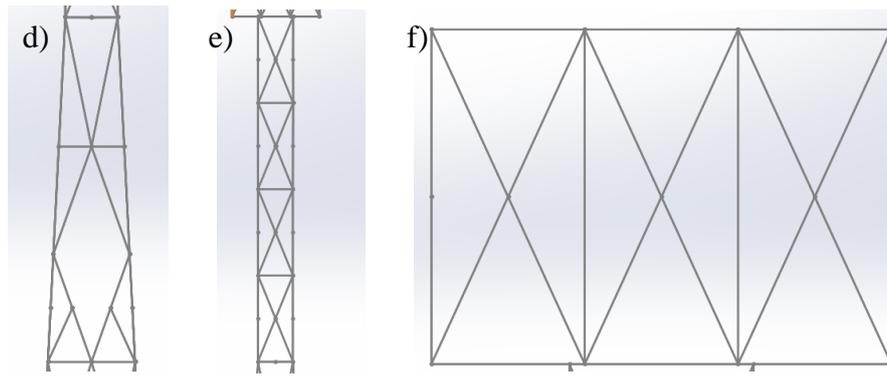
$$q_z = 0.002558 \cdot 1.3 \cdot 11.41^2$$

$$q_z = 0.433 \frac{lb}{ft^2}$$

$$q_z = 2.114 \frac{kg}{m^2}$$

En la Figura 17 se observa los tramos, a) es el primer tramo a 2m de altura, b) es el 2do tramo a 6m de altura, c) es el tercer tramo a 10m de altura, d) es el cuarto tramo a 14m de altura, e) es el quinto tramo a 20m de altura y f) es el sexto tramo a 21.1 m de altura.





**Figura 17.** Tramos de la torre [32].

En la Tabla 3 se indica las longitudes, para determinar las áreas solidas de cada tramo y el área total de cada tramo. La ecuación de área total del tramo está compuesta por la base mayor más menor y multiplicadas por la altura del tramo sobre 2, como indica la fórmula.

$$A_{tot} = \frac{(base_{mayor} + base_{menor}) \cdot altura}{2} \quad (14)$$

**Tabla 3.** Longitudes y áreas totales del tramo y área sólida.

Tramo	Partes	Perfil tipo L [m]		Cantidad	Área [m <sup>2</sup> ]	Aat [m <sup>2</sup> ]	Atot [m <sup>2</sup> ]
1	Piernas	0.076	2.008	2	0.3052	0.8666	3.8000
	Diagonal principal	0.064	2.238	2	0.2865		
	Horizontal principal	0.076	1.800	1	0.1368		
	Celosía	0.064	1.079	2	0.1381		
2	Piernas	0.076	4.009	2	0.6094	1.5352	8.0000
	Diagonal principal	0.064	2156	4	0.5519		
	Horizontal principal	0.076	1.400	1	0.1064		
	Celosía	0.064	1.045	4	0.2675		
3	Piernas	0.102	4.009	2	0.8178	1.8656	6.0000
	Diagonal principal	0.076	2.090	4	0.6354		
	Horizontal principal	0.102	1.000	1	0.1020		
	Celosía	0.076	1.021	4	0.3104		
4	Piernas	0.102	4.009	2	0.8178	1.6487	4.0000
	Diagonal principal	0.076	1.325	6	0.6042		
	Horizontal principal	0.102	0.600	2	0.1224		
	Celosía	0.076	0.686	2	0.1043		
5	Piernas	0.102	1.500	8	1.2240	2.3901	3.6000
	Diagonal principal	0.076	0	0	0.0000		

<b>6</b>	Horizontal principal	0.102	0.600	3	0.1836	1.0812	1.6500
	Celosía	0.076	0.808	16	0.9825		
	Piernas	0.102	1.100	2	0.2244		
	Diagonal principal	0.076	0	0	0.0000		
	Horizontal principal	0.102	1.500	2	0.3060		
	Celosía	0.076	0.604	12	0.5508		

En la siguiente Tabla 4 se indica la relación de esbeltez ( $\varphi$ ) para torres de celosía, para secciones transversales cuadradas y triangulares equiláteros con miembros de lados planos.

**Tabla 4.** Coeficiente de arrastre para torres de sección cuadrada.

Relación de solidez $\varphi$	Sobre una cara $C_a$
<b>0.1</b>	3.5
<b>0.2</b>	2.8
<b>0.3</b>	2.5
<b>0.4</b>	2.1
<b>0.5</b>	1.8

A continuación, se procede a encontrar el coeficiente de arrastre para luego encontrar la fuerza equivalente en cada punto, calculando la relación de esbeltez de la cara frontal de cada tramo y luego se interpola con respecto a la tabla 2.

$$\varphi = \frac{A_{at}}{A_{tot}} \quad (15)$$

Tramo 1 de la torre:

$$\varphi = \frac{0.8666}{3.8000} = 0.2281$$

$$C_a = 2.7157$$

$$F_{eq} = q_z \cdot C_a \cdot A_{at} \cdot F_{AD} \quad (16)$$

$$F_{eq} = 2.114 \frac{kg}{m^2} \cdot 2.7157 \cdot 0.8666 m^2 \cdot 1.2935$$

$$F_{eq} = 5.5768 kg$$

$$F_{eq} = 5.5768 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{eq} = 54.7 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada nodo es de 7.81 N, debido a los 7 nodos existentes.

Tramo 2 de la torre:

$$\varphi = \frac{1.5352}{8.0000} = 0.1919$$

$$C_a = 2.87$$

$$F_{eq} = q_z \cdot C_{at} \cdot A_{at} \cdot F_{AD}$$

$$F_{eq} = 2.114 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 2.87 \cdot 1.5352 \text{ m}^2 \cdot 1.2935$$

$$F_{eq} = 12.048 \text{ kg}$$

$$F_{eq} = 12.048 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{eq} = 118.19 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada nodo es de 9.84 N, debido a los 12 nodos existentes.

Tramo 3 de la torre:

$$\varphi = \frac{1.8656}{6.0000} = 0.3109$$

$$C_a = 2.4564$$

$$F_{eq} = q_z \cdot C_{at} \cdot A_{at} \cdot F_{AD}$$

$$F_{eq} = 2.114 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 2.4564 \cdot 1.8656 \text{ m}^2 \cdot 1.2935$$

$$F_{eq} = 12.53 \text{ kg}$$

$$F_{eq} = 12.53 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{eq} = 122.93 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada nodo es de 10.24 N, debido a los 12 nodos existentes.

Tramo 4 de la torre:

$$\varphi = \frac{1.6487}{4.0000} = 0.4122$$

$$C_a = 2.0634$$

$$F_{eq} = q_z \cdot C_{at} \cdot A_{at} \cdot F_{AD}$$

$$F_{eq} = 2.114 \frac{kg}{m^2} \cdot 2.0634 \cdot 1.6487 m^2 \cdot 1.2935$$

$$F_{eq} = 15.33 kg$$

$$F_{eq} = 15.33 kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{eq} = 150.45 N$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada nodo es de 12.54 N, debido a los 12 nodos existentes.

Tramo 5 de la torre:

$$\varphi = \frac{2.3901}{3.6000} = 0.6639$$

$$C_a = 1.75$$

$$F_{eq} = q_z \cdot C_{at} \cdot A_{at} \cdot F_{AD}$$

$$F_{eq} = 2.114 \frac{kg}{m^2} \cdot 1.75 \cdot 2.3901 m^2 \cdot 1.2935$$

$$F_{eq} = 11.44 kg$$

$$F_{eq} = 11.44 kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{eq} = 112.2 N$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada nodo es de 8.01 N, debido a los 14 nodos existentes.

Tramo 6 de la torre:

$$\varphi = \frac{1.0812}{1.6500} = 0.6553$$

$$C_a = 1.78$$

$$F_{eq} = q_z \cdot C_{at} \cdot A_{at} \cdot F_{AD}$$

$$F_{eq} = 2.114 \frac{kg}{m^2} \cdot 1.78 \cdot 1.0812 m^2 \cdot 1.2935$$

$$F_{eq} = 5.26 \text{ kg}$$

$$F_{eq} = 5.26 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{eq} = 51.62 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza ejercida en cada nodo es de 4.69 N, debido a los 11 nodos existentes.

### 2.3.3. Cálculo de cargas muertas

Se calculó el peso propio de la armadura (P), según el perfil requerido, como es el perfil tipo L dependiendo del tramo se escoge varios perfiles, que cumplan con el ratio y no se encuentren sobre dimensionadas, en la Tabla 5 se analiza las cargas obtenidas mediante el software especializado, la siguiente formula explica la obtención de las cargas, la multiplicación se hace entre el área de la sección ( $A_{seccion}$ ), la longitud del perfil (L) y densidad del acero ( $\delta_{acero}$ ) siendo este de  $7850 \frac{\text{KG}}{\text{m}^3}$  [32].

$$P = A_{seccion} \cdot L \cdot \rho_{acero} \quad (17)$$

Tabla 5. Coeficiente de arrastre para torres de sección cuadrada.

Seccion	Cantidad	Longitud	Peso [N]
L51X51X3.2	121	64823.65	1.557
L51X51X4.8	15	12376.09	0.439
L64X38X4.8	21	13814.17	0.49
L64X51X4.8	40	38516.97	1.548
L64X51X6.4	1	700	0.037
L64X64X4.8	47	49603.32	2.218
L76X51X4.8	40	36924.92	1.654
L76X51X6.4	16	13642.55	0.806
L76X64X4.8	30	27909.97	1.381
L76X64X6.4	20	22581.86	1.469
L76X76X4.8	19	20174.28	1.092
L76X76X6.4	2	2123.42	0.152
L89X64X6.4	25	17203.98	1.23
L89X76X6.4	8	10763.07	0.837
L89X89X6.4	10	19125.79	1.605
L102X76X6.4	6	6337.29	0.532
L102X89X6.4	8	13262.78	1.194
L102X89X7.9	3	6014.98	0.671
L102X102X7.9	1	2004.99	0.239
L102X102X15.9	14	15195.03	3.474

## 2.4. Análisis de conexiones

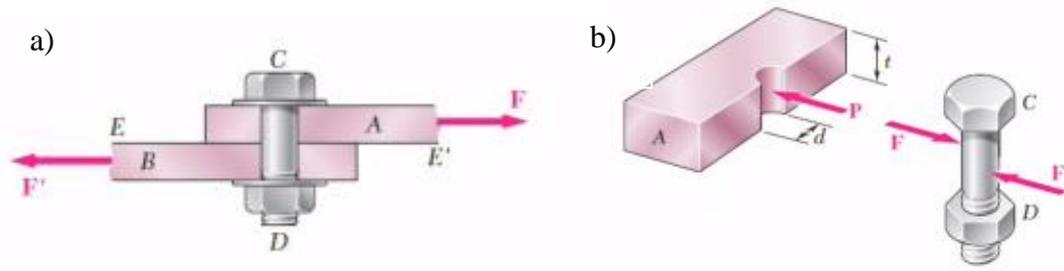
Las conexiones tipo tornillos y pernos se realiza mediante la norma Estándar Specifications for high strength hardened washers (ASTM A325) [33], según las normas especiales para estructuras de telecomunicaciones, manifiesta que el diámetro de tornillos mínimo debe ser M12 el tornillo puede sobresalir de 1/4 - 1/2 in al ras de tuercas, es necesario usar rondana de presión, dependiendo la posición de la conexión se debe ir de la parte externa hacia interna, y de la parte superior a la inferior. En la Tabla 6 se indica el torque que la norma sugiere para tornillería tipo A325.

**Tabla 6.** Torque para tornillería según el diámetro nominal.

Diámetro nominal [in]	Área de esfuerzo [in <sup>2</sup> ]	Tensión mínima [lb]	Torque [lb ft]	
			En seco	Lubricado
1/2	0.1419	12000	105	79
5/8	0.226	19000	210	155
3/4	0.334	28000	365	275
7/8	0.462	39000	595	448
1	0.606	51000	890	670
11/8	0.763	56000	1100	825
11/4	0.969	71000	1550	1165
11/2	1.405	103000	2700	2025

La holgura como factor de corrección, esta dimensionado muy cerca al gramil es decir al diámetro nominal del tornillo, por lo tanto, si el tornillo es de 25.4 mm debe tener una holgura de 3.2 mm con respecto al diámetro del tonillo.

Las conexiones evaluadas son las consideras las más desfavorables para la torre las cuales se ubican en la parte inferior de la misma, por tanto, que soportan el peso y cargas de toda la torre, a continuación, se indica en la Figura 18 los diagramas de resistencia a corte y aplastamiento, se realiza el cálculo de las conexiones de montante y conexiones de diagonales.



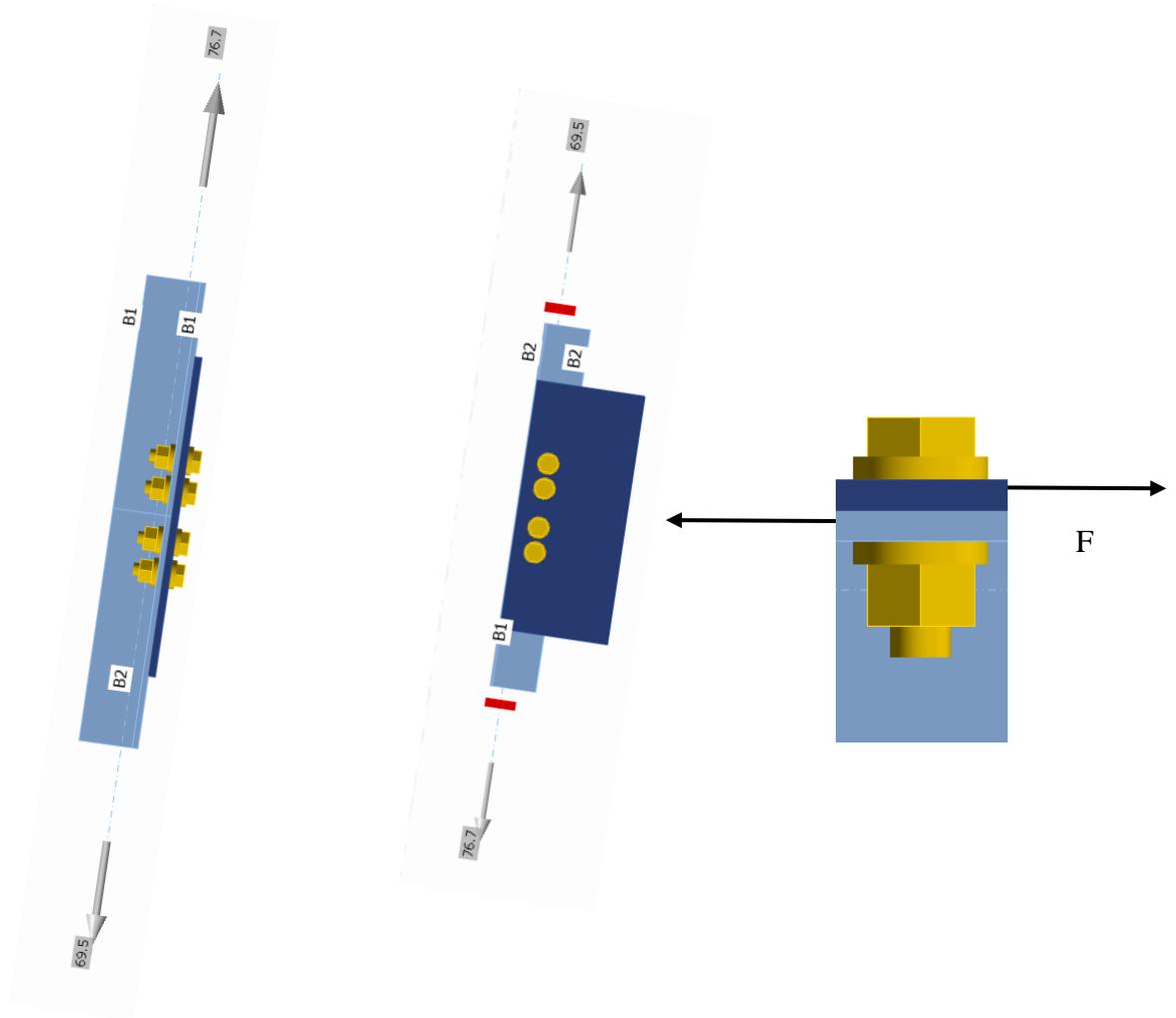
**Figura 18.** Verificación de resistencias. a) por corte y b) por aplastamiento [34].

### 2.4.1. Conexión por montantes

El criterio de conexión se basa según la normativa AISC 360 16, donde especifica los requerimientos para conexiones por LRFD; el dimensionamiento y cálculo, de la resistencia de montantes en la conexión de ángulos dobles, primero se dimensiona y se verifica la conexión montante-montante mediante resistencia la resistencia al corte del perno, luego por resistencia al aplastamiento, segundo se dimensiona y se calcula la conexión montante diagonal, mediante la verificación por corte del perno y resistencia al aplastamiento.

#### 2.4.1.1. Conexión por montante-montante

La fuerza actuante a compresión ( $P_c$ ) y tracción ( $P_T$ ) de los elementos montantes son 69.48 y 76.68 kN respectivamente. Se utiliza perfiles tipo L55X6 de acero A36 cuyos esfuerzos a la fluencia ( $Fy_{A36}$ ) y a la rotura ( $Fu_{A36}$ ) son 250 y 400 MPa respectivamente, también 8 pernos (n) de acero A325 de 12.7 mm de diámetro ( $\phi_p$ ) cuyo esfuerzo a la fluencia ( $Fy_{A325}$ ) y a la rotura ( $Fu_{A325}$ ) son 620 y 825 MPa respectivamente. La distancia del perno al borde ( $L_c$ ) es proporcional al diámetro como indica la siguiente formula [34]. En la Figura 19 se indica el diagrama de cuerpo libre de la unión.



**Figura 19.** Diagrama de cuerpo libre.

$$L_c = 1.5 \cdot \phi \quad (18)$$

$$L_c = 1.5 \cdot 12.7 \text{ mm}$$

$$L_c = 19.05 \text{ mm}$$

#### 2.4.1.2. Resistencia del perno montante al corte:

El factor de resistencia al corte ( $\phi$ ) es 0.75, y el área bruta de sección circular del perno ( $A_p$ ) es  $126.68 \text{ mm}^2$ , por lo tanto, la resistencia al corte ( $Rn_{corte}$ ) se calcula con la siguiente formula:

$$Rn_{corte} = 0.55 \cdot \phi \cdot Fy_{A325} \cdot A_p \quad (19)$$

$$Rn_{corte} = 0.55 \cdot 0.75 \cdot 620 \cdot 10^3 \text{ kPa} \cdot 126.68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Rn_{corte} = 32.39 \text{ kN}$$

### 2.4.1.3. Resistencia del montante al aplastamiento:

Se usa un factor de resistencia al aplastamiento de 0.8, el espesor de la placa ( $t$ ) es de 4 mm y se calcula la resistencia al aplastamiento ( $Rn_{aplast}$ ) de la siguiente manera.

$$Rn_{aplast} = 1.2 \cdot \varphi \cdot \left( Lc + \frac{\phi_p}{4} \right) \cdot t \cdot Fu_{A36} \quad (20)$$
$$Rn_{aplast} = 1.2 \cdot 0.8 \cdot \left( 19.05 \cdot 10^{-3} \text{ m} + \frac{12.7 \cdot 10^{-3}}{4} \right) \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}$$
$$Rn_{aplast} = 51.2 \text{ kN}$$

La resistencia de un solo perno es la resistencia mínima 32.39 kN, que multiplicado por los 8 pernos tiene una fuerza resistente total ( $Rn_{Total}$ ) de 259.18 kN. La ratio ( $r$ ) se determina con la división de la fuerza mayor ( $P_{max}$ ) actuante en el montante y la fuerza actuante total, si el ratio es menor a 1 si cumple.

$$r = \frac{P_{max}}{Rn_{total}} \quad (21)$$
$$r = \frac{76.68 \text{ kN}}{259.18 \text{ kN}}$$
$$r = 0.30$$

A continuación, se evalúa la resistencia a la fractura por corte en el bloque:

La holgura de los agujeros donde entran los pernos se recomienda debe ser 3 mm mayor al diámetro nominal del perno, por eso el diámetro del agujero ( $\phi_a$ ) es de 15.7 mm. Se calcula el área bruta sujeta a corte ( $Ag_v$ ) y a tracción ( $Ag_t$ ), el área neta sujeta a corte ( $An_v$ ) y tracción ( $Ag_t$ ).

El área bruta por corte se da paralelo a la carga, a lo largo del perfil por donde se encuentran los agujeros hasta el centro del último agujero, multiplicado por el espesor de la placa.

$$Ag_v = 2 \cdot \frac{n}{2} \cdot Lc \cdot t \quad (22)$$
$$Ag_v = 2 \cdot \frac{8}{2} \cdot 19.05 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm}$$
$$Ag_v = 914.4 \text{ mm}^2$$

El área bruta sujeta a tracción se da perpendicular a la carga, por lo tanto, el ancho del perfil dividida en 2 es el gramil y se multiplica con el espesor.

$$Ag_t = 2 \cdot \frac{w_L}{2} \cdot t \quad (23)$$

$$Ag_t = 2 \cdot \frac{55 \text{ mm}}{2} \cdot 6 \text{ mm}$$

$$Ag_t = 330 \text{ mm}^2$$

El área neta sujeta a corte es la resta del área bruta por corte menos el diámetro de los agujeros multiplicado por el espesor.

$$An_v = Ag_v - \phi_a \cdot t \cdot (n - 1) \quad (24)$$

$$An_v = 609.6 \text{ mm}^2 - 15.7 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm} \cdot (8 - 1)$$

$$An_v = 255 \text{ mm}^2$$

Finalmente, el área neta sujeta a tracción es la resta del área bruta sujeta a tracción menos 2 veces el diámetro medio de los agujeros multiplicado por el espesor.

$$An_t = Ag_t - 2 \cdot \frac{\phi_a}{2} \cdot t \quad (25)$$

$$An_t = 220 \text{ mm}^2 - 2 \cdot \frac{15.7 \text{ mm}}{2} \cdot 6 \text{ mm}$$

$$An_t = 235.8 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, la resistencia por fractura en el bloque se toma según satisface las siguientes ecuaciones:

$$Fu_{A36} \cdot An_t \geq 0.6 \cdot Fu_{A36} \cdot An_v \quad (26)$$

$$400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \cdot 235.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \geq 0.6 \cdot 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \cdot 255 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$94.32 \text{ kN} \geq 61.2 \text{ kN}$$

Si cumple, por lo tanto, se ejecuta las siguientes fórmulas para determinar cuál es la mínima resistencia ( $Pn_{min}$ ).

$$Pn_1 = 0.6 \cdot Fy_{A36} \cdot Ag_v + Fu_{A36} \cdot An_t \quad (27)$$

$$Pn_1 = 0.6 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \cdot 914.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 + 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \cdot 235.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Pn_1 = 231.48 \text{ KN}$$

$$Pn_2 = 0.6 \cdot Fu_{A36} \cdot An_v + Fu_{A36} \cdot An_t \quad (28)$$

$$Pn_2 = 0.6 \cdot 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \cdot 255 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 + 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \cdot 235.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Pn_2 = 155.52 \text{ KN}$$

La resistencia mínima es de 155.8 kN, el cálculo de la resistencia a la fractura en bloque por corte se multiplica por el factor de resistividad de 0.75, por lo tanto, es 116.85 kN, para obtener el ratio se incluye la carga a tensión dividido por los 2 montante. El ratio se calcula para saber si los pernos soportaran la resistencia mínima con respecto a la máxima carga a tensión de cualquiera de las diagonales, para que la conexión sea válida debe cumplir que  $r < 1$ , caso contrario la conexión no sirve.

$$r = \frac{\frac{P_T}{2}}{Pn_{min}} \quad (29)$$

$$r = \frac{\frac{76.68 \text{ kN}}{2}}{116.85 \text{ kN}}$$

$$r = 0.18$$

Por lo tanto, se utiliza 8 pernos M12 para la conexión montante con montante.

#### 2.4.1.4. Conexión por montante-diagonal

La fuerza actuante a compresión ( $P_c$ ) y tracción ( $P_T$ ) de los elementos montantes son 1.33 y 1.77 kN respectivamente. Se utiliza perfiles tipo L35X3 de acero A36 cuyos esfuerzos a la fluencia ( $Fy_{A36}$ ) y a la rotura ( $Fu_{A36}$ ) son 250 y 400 MPa respectivamente, también 2 pernos (n) de acero A325 de 12.7 mm de diámetro ( $\phi_p$ ) cuyo esfuerzo a la fluencia ( $Fy_{A325}$ ) y a la rotura ( $Fu_{A325}$ ) son 620 y 825 MPa respectivamente. La distancia del perno al borde ( $Lc$ ) es proporcional al diámetro como indica la siguiente formula.

$$Lc = 1.5 \cdot \phi \quad (30)$$

$$Lc = 1.5 \cdot 12.7 \text{ mm}$$

$$Lc = 19.05 \text{ mm}$$

#### 2.4.1.5. Resistencia del perno montante al corte:

El factor de resistencia al corte ( $\phi$ ) es 0.75, y el área bruta de sección circular del perno ( $Ap$ ) es  $126.68 \text{ mm}^2$ , por lo tanto, la resistencia al corte ( $Rn_{corte}$ ) se calcula con la siguiente formula:

$$Rn_{corte} = 0.55 \cdot \phi \cdot Fy_{A325} \cdot Ap \quad (31)$$

$$Rn_{corte} = 0.55 \cdot 0.75 \cdot 620 \cdot 10^3 \text{ kPa} \cdot 126.68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Rn_{corte} = 32.39 \text{ kN}$$

#### 2.4.1.6. Resistencia del montante al aplastamiento:

Se usa un factor de resistencia al aplastamiento de 0.8, el espesor de la placa (t) es de 6 mm y se calcula la resistencia al aplastamiento ( $Rn_{aplast}$ ) de la siguiente manera [30].

$$Rn_{aplast} = 1.2 \cdot \phi \cdot \left( Lc + \frac{\phi_p}{4} \right) \cdot t \cdot Fu_{A36} \quad (32)$$

$$Rn_{aplast} = 1.2 \cdot 0.8 \cdot \left( 19.05 \cdot 10^{-3} \text{ m} + \frac{12.7 \cdot 10^{-3}}{4} \right) \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}$$

$$Rn_{aplast} = 51.2 \text{ kN}$$

La resistencia de un solo perno es la resistencia mínima 32.4 kN, que multiplicado por los 2 pernos tiene una fuerza resistente total ( $Rn_{Total}$ ) de 64.8 kN. La ratio (r) se determina con la división de la fuerza mayor ( $P_{max}$ ) actuante en el montante y la fuerza actuante total, si el ratio es menor a 1 si cumple.

$$r = \frac{P_{max}}{Rn_{total}} \quad (33)$$

$$r = \frac{1.77 \text{ kN}}{64.8 \text{ kN}}$$

$$r = 0.027$$

Por lo tanto, se utiliza dos pernos M12 para la conexión montante con cada una de las diagonales existentes.

#### 2.4.2. Conexión por diagonales

Es muy similar a la conexión de montante – diagonal, la fuerza actuante a compresión ( $P_c$ ) y tracción ( $P_T$ ) de los elementos montantes son 2.39 y 1.77 kN respectivamente. Se utiliza perfiles tipo L35X3 de acero A36 cuyos esfuerzos a la fluencia ( $Fy_{A36}$ ) y a la rotura ( $Fu_{A36}$ ) son 250 y 400 MPa respectivamente, también 2 pernos (n) de acero A325 de 12.7 mm de diámetro ( $\phi_p$ ) cuyo esfuerzo a la fluencia ( $Fy_{A325}$ ) y a la rotura ( $Fu_{A325}$ ) son 620 y 825 MPa respectivamente. La distancia del perno al borde (Lc) es proporcional al diámetro como indica la siguiente formula.

$$Lc = 1.5 \cdot \phi$$

$$Lc = 1.5 \cdot 12.7 \text{ mm}$$

$$Lc = 19.05 \text{ mm}$$

#### 2.4.2.1. Resistencia del perno montante al corte:

El factor de resistencia al corte ( $\varphi$ ) es 0.75, y el área bruta de sección circular del perno ( $A_p$ ) es  $126.68 \text{ mm}^2$ , por lo tanto, la resistencia al corte ( $Rn_{corte}$ ) se calcula con la siguiente formula:

$$\begin{aligned} Rn_{corte} &= 0.55 \cdot \varphi \cdot Fy_{A325} \cdot Ap & (34) \\ Rn_{corte} &= 0.55 \cdot 0.75 \cdot 620 \cdot 10^3 \text{ kPa} \cdot 126.68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \\ Rn_{corte} &= 32.39 \text{ kN} \end{aligned}$$

#### 2.4.2.2. Resistencia del montante al aplastamiento:

Se usa un factor de resistencia al aplastamiento de 0.8, el espesor de la placa ( $t$ ) es de 3 mm y se calcula la resistencia al aplastamiento ( $Rn_{aplast}$ ) de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} Rn_{aplast} &= 1.2 \cdot \varphi \cdot \left( Lc + \frac{\phi_p}{4} \right) \cdot t \cdot Fu_{A36} & (35) \\ Rn_{aplast} &= 1.2 \cdot 0.8 \cdot \left( 19.05 \cdot 10^{-3} \text{ m} + \frac{12.7 \cdot 10^{-3}}{4} \right) \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^{-3} \text{ kPa} \\ Rn_{aplast} &= 25.6 \text{ kN} \end{aligned}$$

La resistencia de un solo perno es la resistencia mínima 25.6 kN, que multiplicado por los 4 pernos tiene una fuerza resistente total ( $Rn_{Total}$ ) de 102.4 kN. La ratio ( $r$ ) se determina con la división de la fuerza mayor ( $P_{max}$ ) actuante en el montante y la fuerza actuante total, si el ratio es menor a 1 si cumple.

$$\begin{aligned} r &= \frac{P_{max}}{Rn_{total}} & (36) \\ r &= \frac{2.39 \text{ kN}}{51.2 \text{ kN}} \\ r &= 0.046 \end{aligned}$$

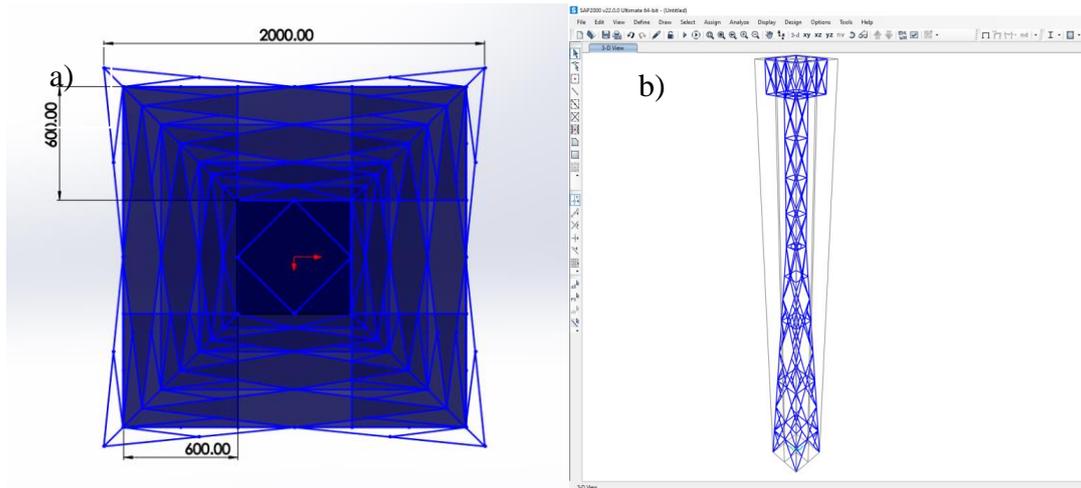
Por lo tanto, se utiliza 4 pernos M12 para la conexión con cada uno de las diagonales existentes.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO Y SIMULACIÓN

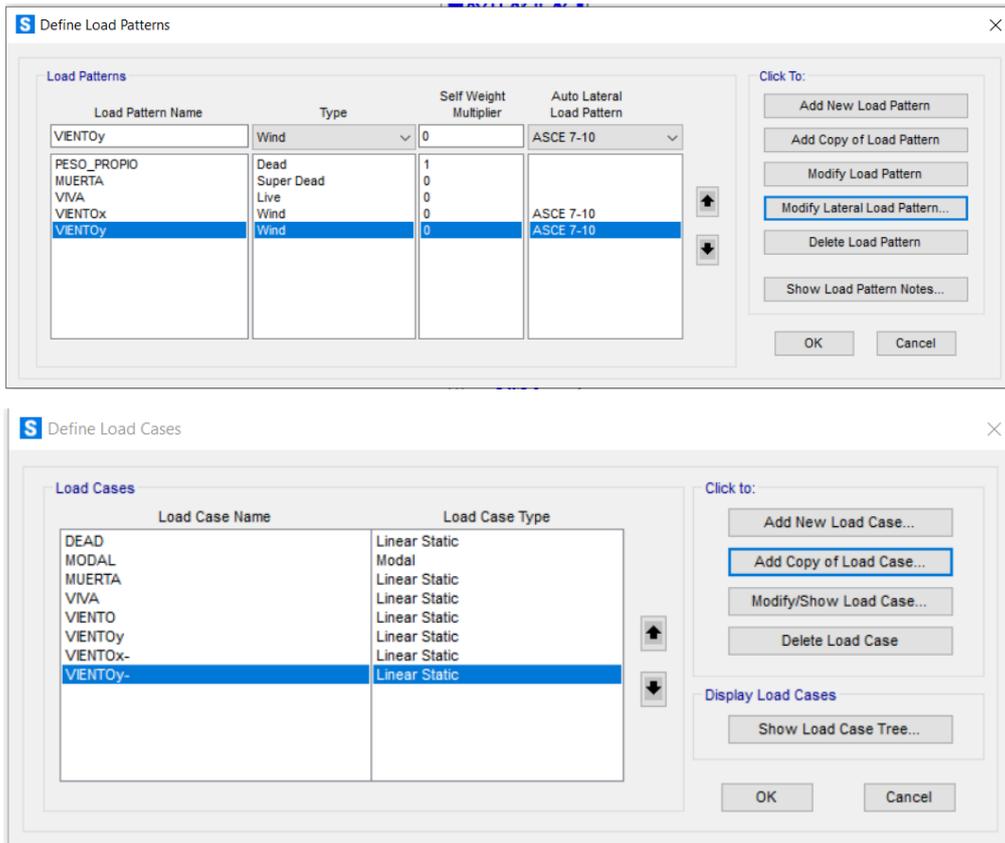
#### 3.1. Configuración de la torre mediante SAP 2000

El diseño de la torre de telecomunicaciones se indica en la Figura 20, el cual tiene una longitud en la base de 2 m, la altura es de 20 m a continuación, se indica el proceso para de elaboración de la torre mediante software especializado, para obtener los esfuerzos de compresión y tensión de cada elemento [36].



**Figura 20.** a) Vista de planta b) Vista isométrica.

Se define las cargas vivas, muertas y de la naturaleza, como son el peso propio, cargas por las antenas, escalera y cables, también las cargas de viento como se indica en la Figura 21. No se analiza cargas de sismo, dado que las torres auto soportadas son livianas y no existe peligro de colapso por sismos. La norma usada para la construcción de torres de telecomunicación es la ASCE 7-10.



**Figura 21.** Definición de cargas.

En la Figura 22 se indica las configuraciones de las cargas de viento en los dos ejes con una velocidad de viento para quito de 18.38 km/h.

**ASCE 7-10 Wind Load Pattern**

**Exposure and Pressure Coefficients**

- Exposure from Extents of Rigid Diaphragms
- Exposure from Frame and Area Objects
  - Include Area Objects
  - Include Frame Objects (Open Structure)

**Wind Exposure Parameters**

Wind Direction Angle: 0

Windward Coeff, Cp: [ ]

Leeward Coeff, Cp: [ ]

Case (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8): [ ]

e1 Ratio (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8): [ ]

e2 Ratio (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8): [ ]

Modify/Show Exposure Widths...

**Wind Coefficients**

Wind Speed (mph): 18360

Exposure Type: B

Topographical Factor, Kzt: 1.25

Gust Factor: 0.85

Directionality Factor, Kd: 0.85

Solid / Gross Area Ratio: 0.2

**Exposure Height**

- Program Calculated
- User Specified

Maximum Global Z: [ ]

Minimum Global Z: [ ]

Reset Defaults

OK

Cancel

**ASCE 7-10 Wind Load Pattern**

**Exposure and Pressure Coefficients**

- Exposure from Extents of Rigid Diaphragms
- Exposure from Frame and Area Objects
  - Include Area Objects
  - Include Frame Objects (Open Structure)

**Wind Exposure Parameters**

Wind Direction Angle: 90

Windward Coeff, Cp: [ ]

Leeward Coeff, Cp: [ ]

Case (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8): [ ]

e1 Ratio (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8): [ ]

e2 Ratio (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8): [ ]

Modify/Show Exposure Widths...

**Wind Coefficients**

Wind Speed (mph): 1830

Exposure Type: B

Topographical Factor, Kzt: 1.25

Gust Factor: 0.85

Directionality Factor, Kd: 0.85

Solid / Gross Area Ratio: 0.2

**Exposure Height**

- Program Calculated
- User Specified

Maximum Global Z: [ ]

Minimum Global Z: [ ]

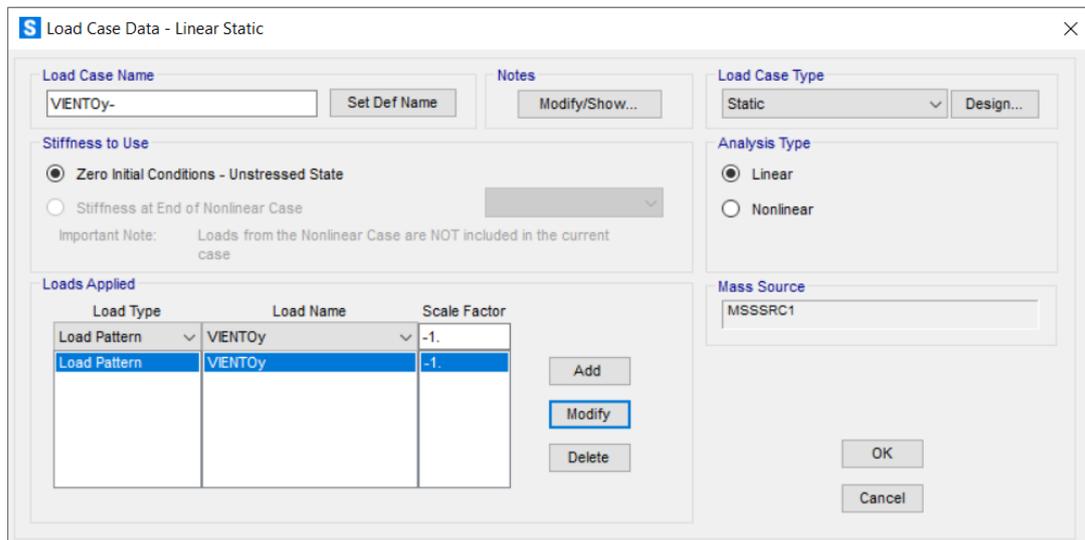
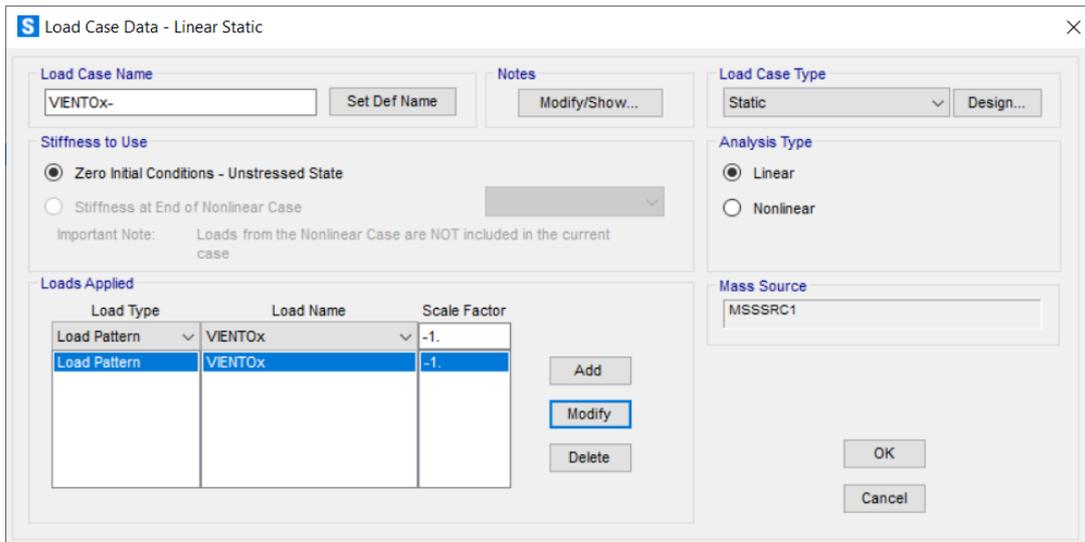
Reset Defaults

OK

Cancel

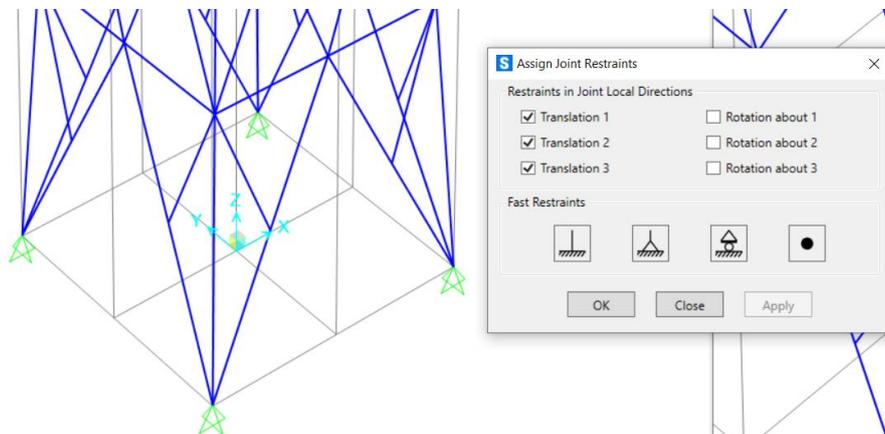
**Figura 22.** Configuración de cargas de viento.

Luego se coloca el factor y el tipo de caso de carga, donde ejercen las fuerzas de viento, como se indica en la Figura 23, el viento en X tiene un factor -1 y en el viento en Y tiene un factor de -1 y el tipo de caso es estático.



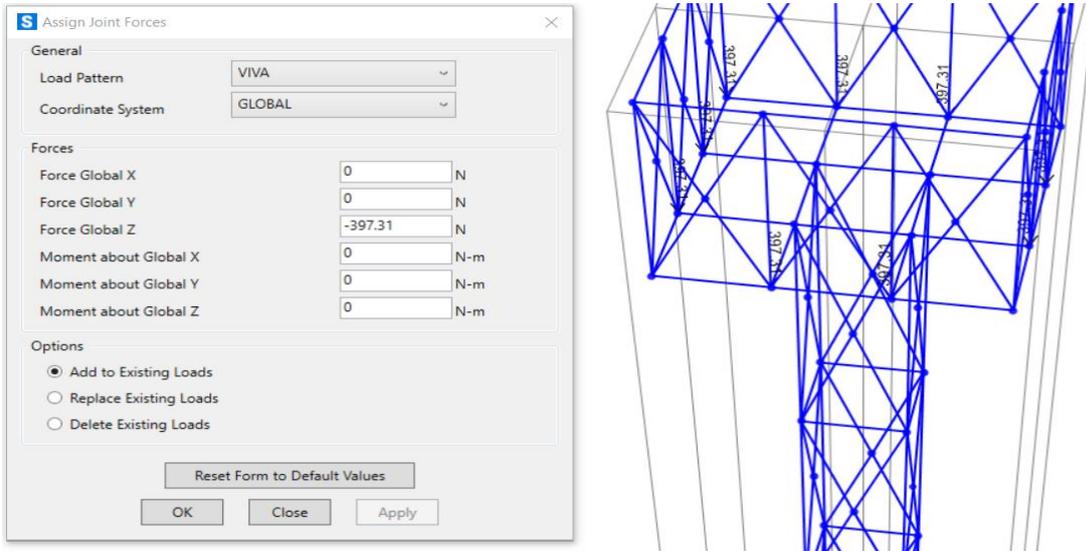
**Figura 23.** Tipo de caso en las cargas de viento.

En la Figura 24 se indica el tipo de apoyo de traslación fija, ubicada en los cuatro extremos, al inicio de la torre.



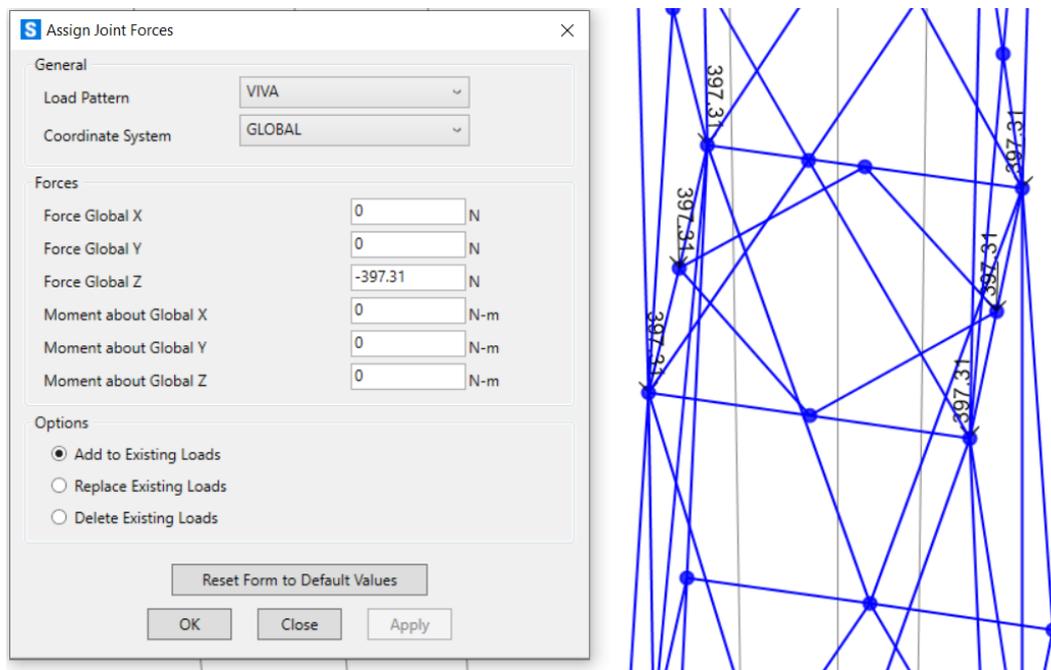
**Figura 24.** Tipo de apoyo.

A continuación, se indica las cargas efectuadas por las 9 antena tipo RF hacia la dirección -z a una altura de 20 m como indica la Figura 25 [37].



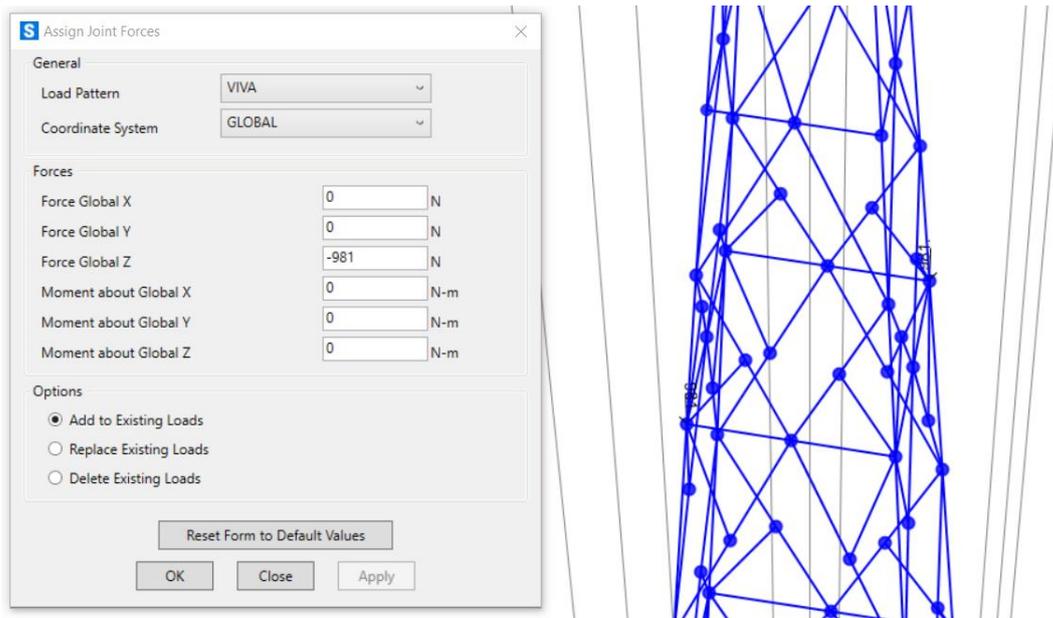
**Figura 25.** Cargas vivas por 9 antenas tipo RF.

Luego se coloca las cargas de las 6 antenas de tipo RF ubicadas a los 14 m de altura, como se indica en la Figura 26.



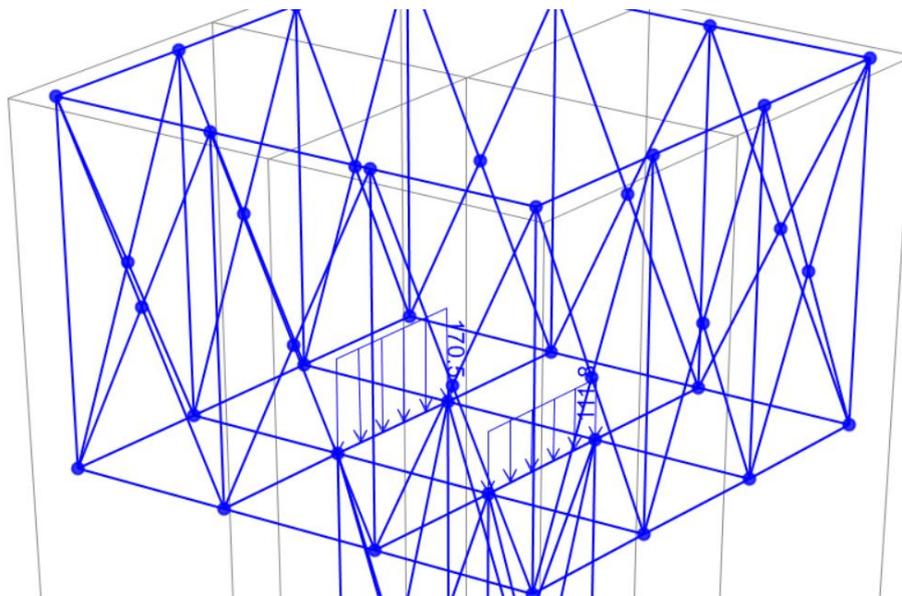
**Figura 26.** Cargas vivas por 6 antenas tipo RF

En la Figura 27 se muestra las cargas de las 2 antenas tipo MW ejercidas a lo largo del eje -z, a una altura de 10 M.



**Figura 27.** Cargas vivas por 6 antenas tipo MW.

Se coloca dos cargas distribuidas de la escalera y los cables como se indica en la Figura 28, a una altura de 20 m.



**Figura 28.** Carga distribuida de la escalera y cables.

Antes de correr el programa se debe dar la condición de articulación en cada uno de los elementos, para liberar el momento, y que actúe la estructura de manera para uniones. En la Figura 30 se indica las condiciones de momento, los cuales muestra que no existe momento en las uniones.

S Assign Frame Releases and Partial Fixity

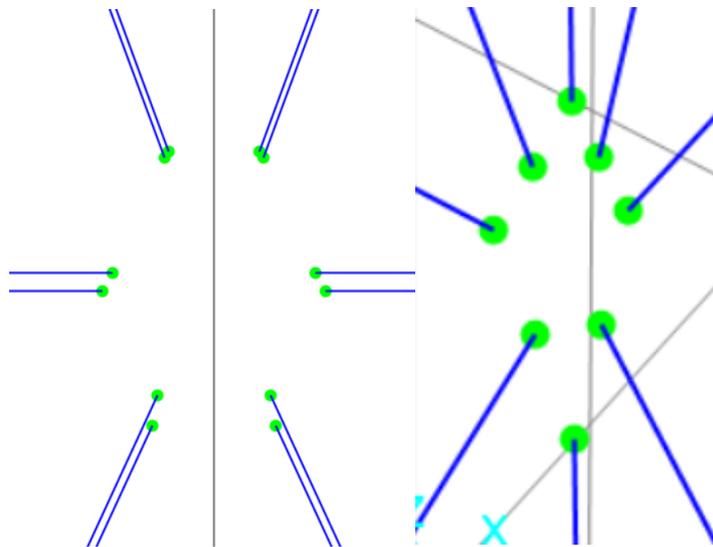
	Release		Frame Partial Fixity Springs	
	Start	End	Start	End
Axial Load	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Shear Force 2 (Major)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Shear Force 3 (Minor)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Torsion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Moment 22 (Minor)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0 kip-in/rad	0 kip-in/rad
Moment 33 (Major)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0 kip-in/rad	0 kip-in/rad

Clear All Releases in Form

OK Close Apply

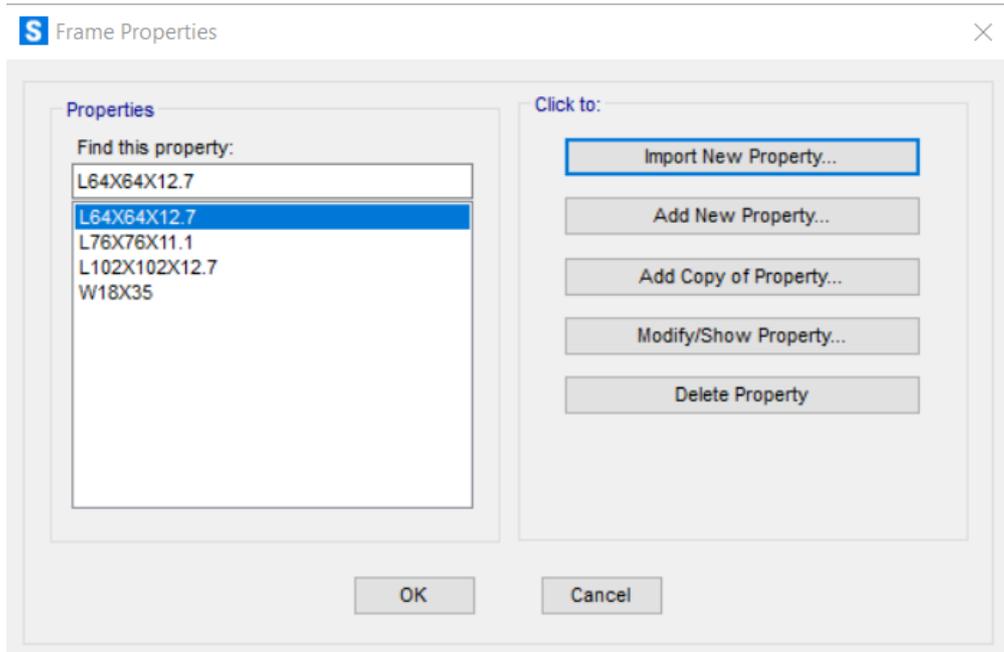
**Figura 29.** Condiciones de momento.

En la Figura 29 se muestra las articulaciones separadas para poder realizar las conexiones que se requiera.



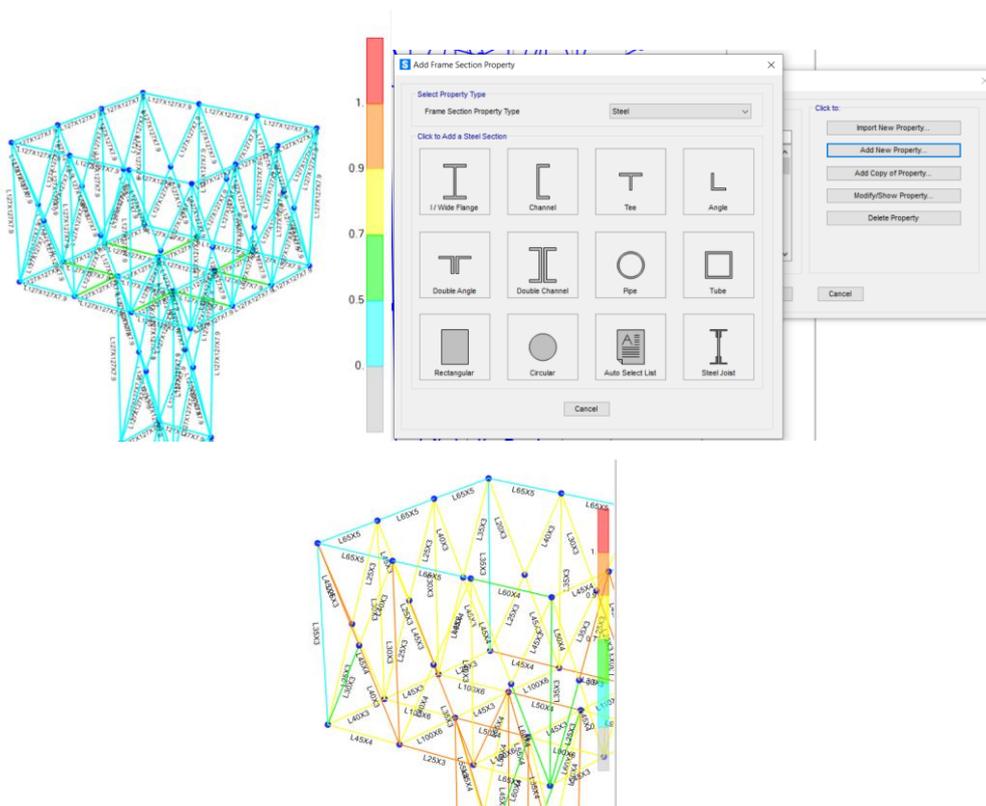
**Figura 30.** Condiciones de articulación separada.

En la Figura 31 se indica la configuración de perfiles, el utilizado es un perfil tipo L, son los más utilizados para torres de telecomunicación y el acero es tipo A36.



**Figura 31.** Configuración de perfiles.

Se puede observar en la Figura 32 que la ratio de los elementos si cumple, sin embargo, se nota que está sobredimensionado, por lo tanto, el software, mediante ciertas configuraciones puede iterar hasta obtener los perfiles más aceptables y ajustados según las cargas a soportar.



**Figura 32.** Iteraciones del software hasta ajustar el perfil.

En el siguiente capítulo se indica los resultados obtenidos con la última iteración que el software genera.

### 3.2. Simulación de conexiones

Se simula mediante software especializado las conexiones tipo montante y diagonales, en este apartado se diseña el tipo de conexiones, indicando el paso a paso del diseño y verificación de datos, para luego encontrar los resultados y señalarlos en el siguiente capítulo.

#### 3.2.1. Simulación de montantes

Se elige el tipo de elemento los cuales serán los montantes y los diagonales que se conectan a los montantes, en la Figura 33 se indica la configuración del montante superior el cual es un perfil tipo L 55X55X6 orientado a 180° con respecto a su eje principal.

B1 [Elemento]		Seleccionar portante	Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>				
Sección transversal	11 - HS55/55/6			
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>			
Simetría Z	<input type="checkbox"/>			
Tipo geométrico	Acabado			
<b>Posición</b>				
Definido por	Rotaciones			
β - Dirección [°]	0.0			
γ - Inclinación [°]	0.0			
α - Rotación [°]	180.0			
Desplazamiento ex [mm]	0			
Desplazamiento ey [mm]	0			
Desplazamiento ez [mm]	0			
Align	In node			
<b>Modelo</b>				
Tipo de modelo	N-Vy-Vz			
Fuerzas en	Tornillos			

**Figura 33.** Configuración montante superior.

En la Figura 34 se indica la diagonal izquierda superior, cuyo perfil es tipo L 35X35X3, su orientación por su complejidad fue vectorizado en coordenadas x, y, z cuyos volares fueron 1,-1 y 0 respectivamente y con una rotación de 180°.

D1 [Elemento portante]		Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>			
Sección transversal	6 - HS35/35/3		
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>		
Simetría Z	<input type="checkbox"/>		
Tipo geométrico	Acabado		
<b>Posición</b>			
Definido por	Vector 3D		
Eje X [m]	1.00 -1.00 0.00		
$\alpha$ - Rotación [°]	180.0		
Desplazamiento ex [mm]	75		
Desplazamiento ey [mm]	0		
Desplazamiento ez [mm]	-6		
Align	In node		
<b>Modelo</b>			
Tipo de modelo	N-Vy-Vz		
Fuerzas en	Tornillos		

**Figura 34.** Configuración diagonal izquierda superior

A continuación, se presenta la diagonal izquierda inferior, perfil tipo L 35X35X3 cuya orientación está dada por medio de rotaciones como se indica en la Figura 35, la inclinación es de  $-45^\circ$ , rotación de  $180^\circ$  y dirección 0.

D2 [Elemento]		Seleccionar portante	Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>				
Sección transversal	5 - HS35/35/3			
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>			
Simetría Z	<input type="checkbox"/>			
Tipo geométrico	Acabado			
<b>Posición</b>				
Definido por	Rotaciones			
$\beta$ - Dirección [°]	0.0			
$\gamma$ - Inclinación [°]	-45.0			
$\alpha$ - Rotación [°]	180.0			
Desplazamiento ex [mm]	75			
Desplazamiento ey [mm]	-6			
Desplazamiento ez [mm]	0			
Align	In node			
<b>Modelo</b>				
Tipo de modelo	N-Vy-Vz			
Fuerzas en	Tornillos			

**Figura 35.** Configuración diagonal izquierda inferior.

En la Figura 36 se muestra la configuración del montante inferior, con perfil tipo L 55X55X6, definido por rotaciones de dirección, inclinación y rotación, cuyos valores son  $180^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $270^\circ$  respectivamente.

B2 [Elemento]		Seleccionar portante	Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>				
Sección transversal	8 - HS55/55/6			
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>			
Simetría Z	<input type="checkbox"/>			
Tipo geométrico	Acabado			
<b>Posición</b>				
Definido por	Rotaciones			
$\beta$ - Dirección [°]	180.0			
$\gamma$ - Inclinación [°]	0.0			
$\alpha$ - Rotación [°]	270.0			
Desplazamiento ex [mm]	0			
Desplazamiento ey [mm]	0			
Desplazamiento ez [mm]	0			
Align	In node			
<b>Modelo</b>				
Tipo de modelo	N-Vy-Vz			
Fuerzas en	Tornillos			

**Figura 36.** Configuración montante inferior.

Luego se procede a configurar el elemento diagonal derecha inferior como se indica en la Figura 37, el tipo de perfil es L 35X35X3, está definido mediante vector en x, y, z cuyos valores son -1, -1, 0 respectivamente y rotación de 270°.

D3 [Elemento]		Seleccionar portante	Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>				
Sección transversal	4 - HS35/35/3			
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>			
Simetría Z	<input type="checkbox"/>			
Tipo geométrico	Acabado			
<b>Posición</b>				
Definido por	Vector 3D			
Eje X [m]	-1.00 -1.00 0.00			
$\alpha$ - Rotación [°]	270.0			
Desplazamiento ex [mm]	75			
Desplazamiento ey [mm]	-6			
Desplazamiento ez [mm]	0			
Align	In node			
<b>Modelo</b>				
Tipo de modelo	N-Vy-Vz			
Fuerzas en	Tornillos			

**Figura 37.** Configuración diagonal derecha inferior.

En la Figura 38 se muestra la configuración de la diagonal derecha superior, el tipo de perfil es L 35X35X3 definido mediante rotación, la dirección es a 180°, inclinación a -45° y rotación de 270°.

D4 [Elemento] Seleccionar portante Copia Eliminar

▼ **Propiedades**

Sección transversal 7 - HS35/35/3 ✎ +

Espejo respecto Y

Simetría Z

Tipo geométrico Acabado ▼

▼ **Posición**

Definido por Rotaciones ▼

$\beta$  - Dirección [°] 180.0

$\gamma$  - Inclinación [°] -45.0

$\alpha$  - Rotación [°] 270.0

Desplazamiento ex [mm] 75

Desplazamiento ey [mm] 0

Desplazamiento ez [mm] -6

Align In node ▼

▼ **Modelo**

Tipo de modelo N-Vy-Vz-Mx-My-Mz ▼

Fuerzas en Nudo ▼

**Figura 38.** Configuración diagonal derecha superior.

A continuación, están las cargas de cada elemento, dichos esfuerzos se obtuvieron en el capítulo de resultados, los cuales para su verificación se indica en la Figura 39.

LE1 [Carga] Copia Eliminar

	Elemento	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
>	B1 / Finalizar	76.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D1 / Finalizar	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D2 / Finalizar	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B2 / Finalizar	69.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D3 / Finalizar	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D4 / Finalizar	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Figura 39.** Cargas de cada elemento.

Luego se procede a configurar el tipo de conexión que existe, en la Figura 40 se muestra la conexión placa SPL1 con las alas de los montantes del elemento B1 y B2.

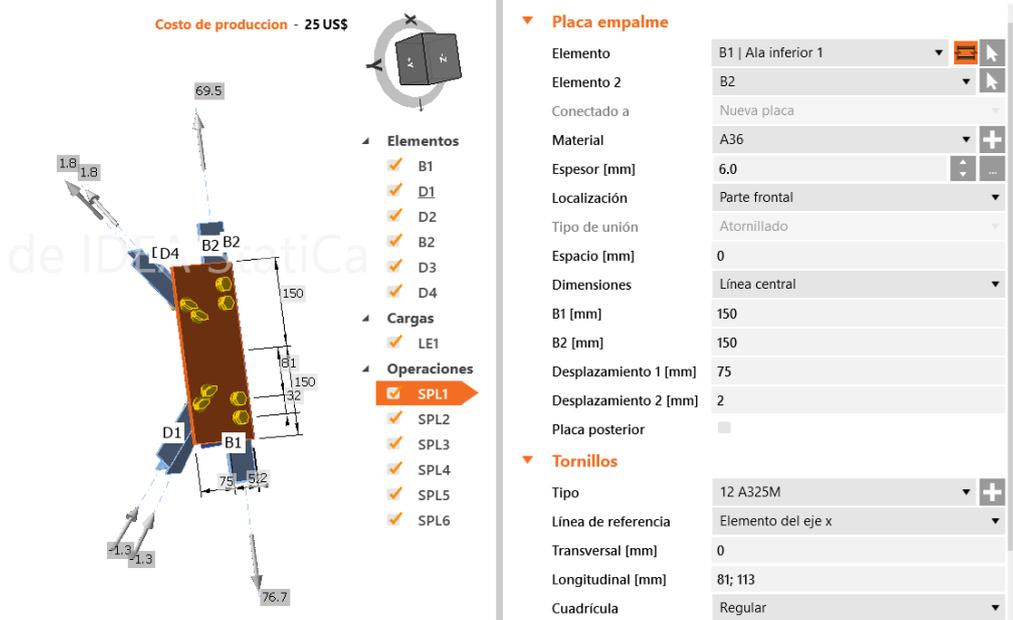


Figura 40. Conexión SPL1.

Luego está la configuración de la placa SPL2 con el alma de los montantes del elemento B1 y B2, como se indica en la Figura 41.

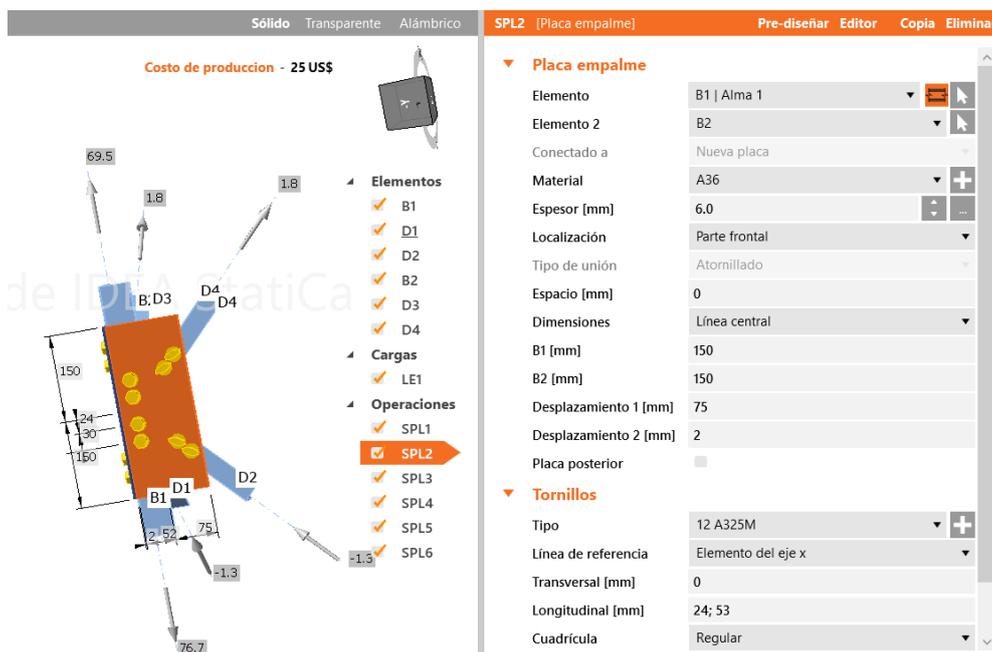
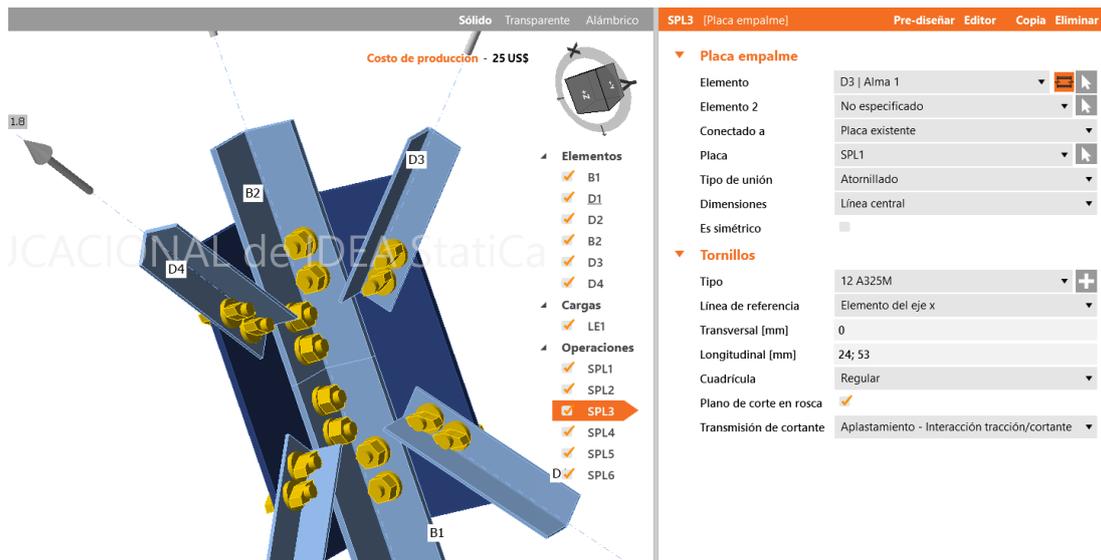


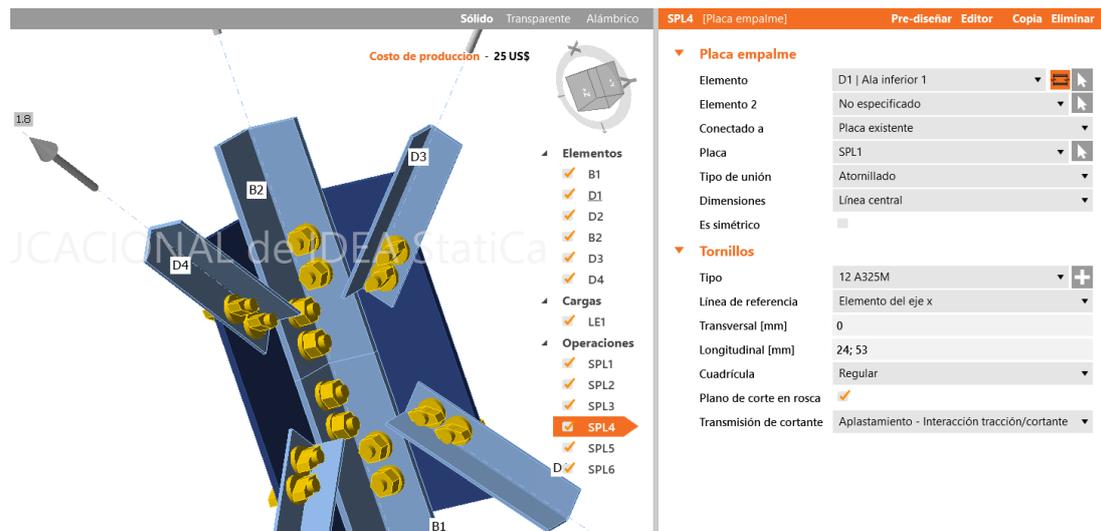
Figura 41. Conexión SPL2.

En la Figura 42 se muestra las configuraciones entre la placa existente SPL1 y el alma del elemento D3 diagonal superior izquierda, con tornillos tipo M12 de acero A325, cuya distancia longitudinal entre pernos es de 24 y 53 mm.



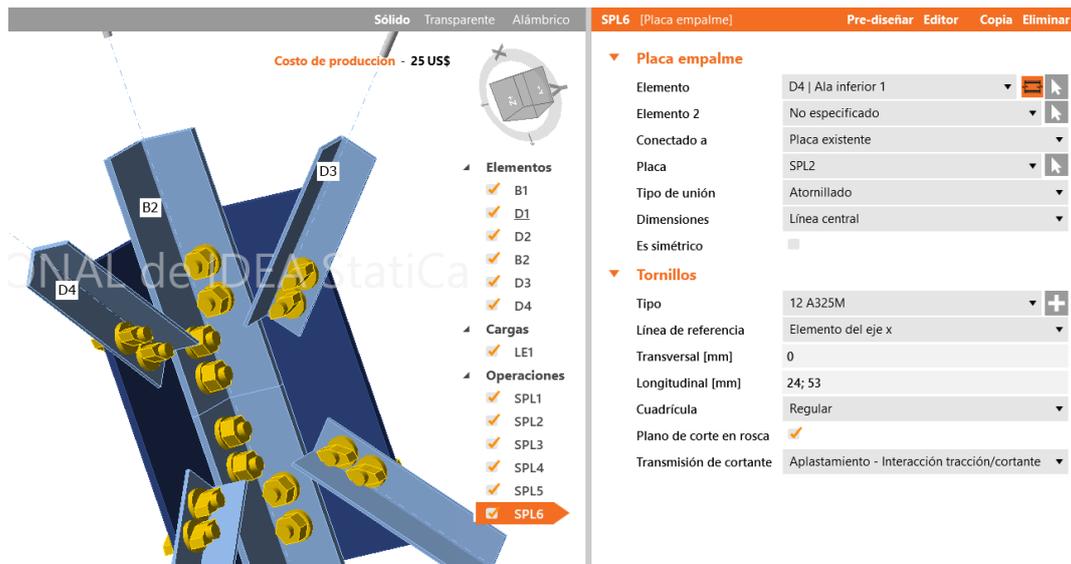
**Figura 42.** Unión alma del elemento D3 con la placa existente SPL1.

En la Figura 43 se indica las configuraciones entre la placa existente SPL1 y el ala inferior del elemento D1 diagonal derecha inferior, con tornillos tipo M12 de acero A325, cuya distancia longitudinal entre pernos es de 24 y 53 mm.



**Figura 43.** Unión entre el ala inferior del elemento D1 con la placa existente SPL1.

En la Figura 44 está la configuración entre la placa existente SPL2 y el ala inferior del elemento D4 diagonal derecha superior, con tornillos tipo M12 de acero A325, cuya distancia longitudinal entre pernos es de 24 y 53 mm.



**Figura 44.** Unión entre el ala inferior del elemento D4 y la placa existente SPL2.

Mediante la hoja de cálculos que genera el software especializado, se verifica todas las configuraciones, en la Figura 45 se muestra la configuración de la norma, el cual es usado para la verificación de conexiones AISC 360-16.

#### Configuración de la norma

Ítem	Valor	Unidad	Referencia
Coefficiente de fricción - hormigón	0.40	-	ACI 349 – B.6.1.4
Coefficiente de fricción en la resistencia a deslizamiento	0.30	-	AISC 360-16 J3.8
Deformación plástica límite	0.05	-	
Detallado	No		
Distancia entre tornillos [d]	2.66	-	AISC 360-16 – J3.3
Distancia entre tornillos y el borde [d]	1.25	-	AISC 360-16 – J.3.4
Resistencia al arrancamiento del cono de hormigón	Ambos		
Resistencia del metal base en la cara de fusión de la soldadura	No		AISC 360-16: J2-2
La deformación en el orificio del perno con la carga de servicio es una consideración de diseño	Sí		AISC 360-16: J3.10
Hormigón fisurado	Sí		ACI 318-14 – Chapter 17
Comprobación de la deformación local	No		
Deformación límite local	0.03	-	CIDECT DG 1, 3 - 1.1
No linealidad geométrica (GMNA)	Sí		Grandes deformaciones para secciones huecas

**Figura 45.** Configuración de la Norma.

En la Figura 46, está la geometría de todos los elementos, como verificación de todo lo anteriormente mencionado.

## Elementos

### Geometry

Nombre	Sección transversal	$\beta$ - Dirección [°]	$\gamma$ - Inclinación [°]	$\alpha$ - Rotación [°]	Desplazamiento ex [mm]	Desplazamiento ey [mm]	Desplazamiento ez [mm]	Fuerzas en	X [mm]
B1	11 - HS55/55/6	0.0	0.0	180.0	0	0	0	Tornillos	68
D1	6 - HS35/35/3	0.0	-45.0	180.0	75	0	-6	Tornillos	38
D2	5 - HS35/35/3	0.0	45.0	180.0	75	-6	0	Tornillos	39
B2	8 - HS55/55/6	180.0	0.0	270.0	0	0	0	Tornillos	68
D3	4 - HS35/35/3	180.0	-45.0	270.0	75	-6	0	Tornillos	38
D4	7 - HS35/35/3	180.0	45.0	270.0	75	0	-6	Nodo	0

Figura 46. Geometría de elementos.

A continuación, en la Figura 47 se indica el material de cada elemento o sección el cual es el A36, para los tornillos el A325M y se verifica las fuerzas a tensión y compresión de cada elemento, los cuales intervienen para la conexión.

### Secciones

Nombre	Material
11 - HS55/55/6	A36
6 - HS35/35/3	A36
5 - HS35/35/3	A36
8 - HS55/55/6	A36
4 - HS35/35/3	A36
7 - HS35/35/3	A36

### Tornillos

Nombre	Conjunto de tornillo	Diámetro [mm]	fu [MPa]	Área bruta [mm <sup>2</sup> ]
12 A325M	12 A325M	12	830.0	113

### Cargas (Fuerzas en equilibrio)

Nombre	Elemento	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LE1	B1	76.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D1	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D2	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B2	69.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D3	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	D4	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### Datos de diseño

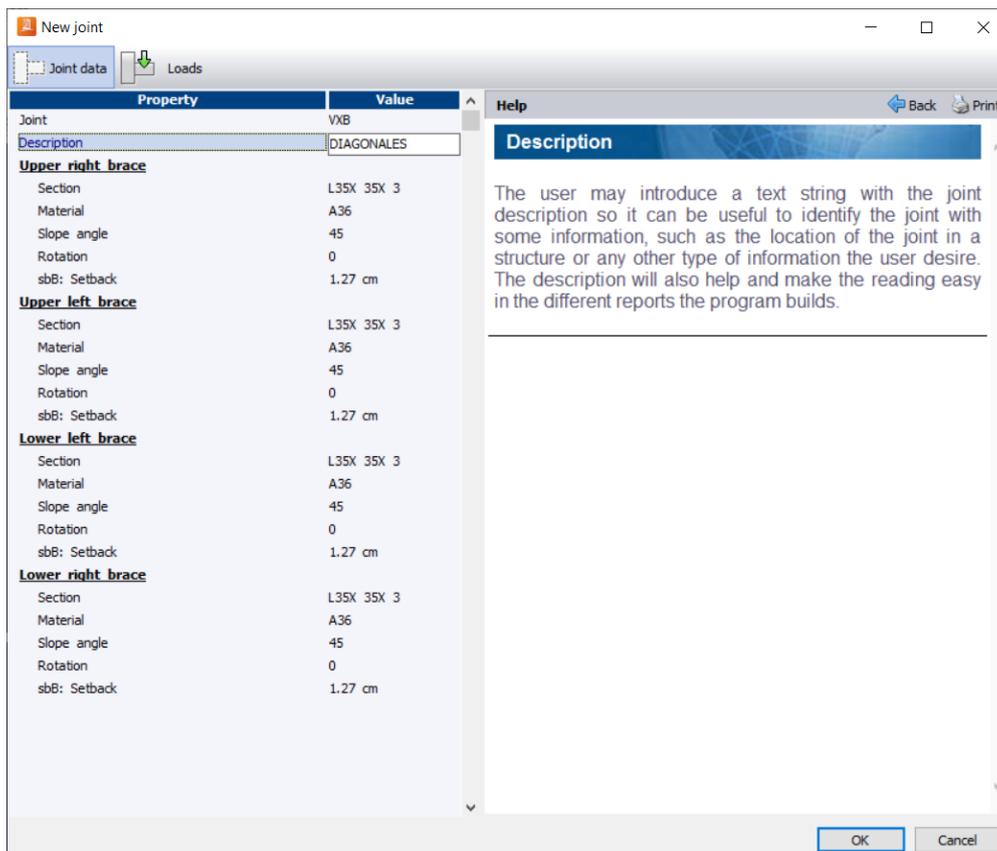
Material	Fy [MPa]	$\epsilon_{lim}$ [%]
A36	248.2	5.0

Figura 47. Materiales de cada sección y tornillos.

En el capítulo 3 se indica los resultados obtenidos, como verificación de lo calculado anteriormente.

### 3.2.2. Simulación de diagonales

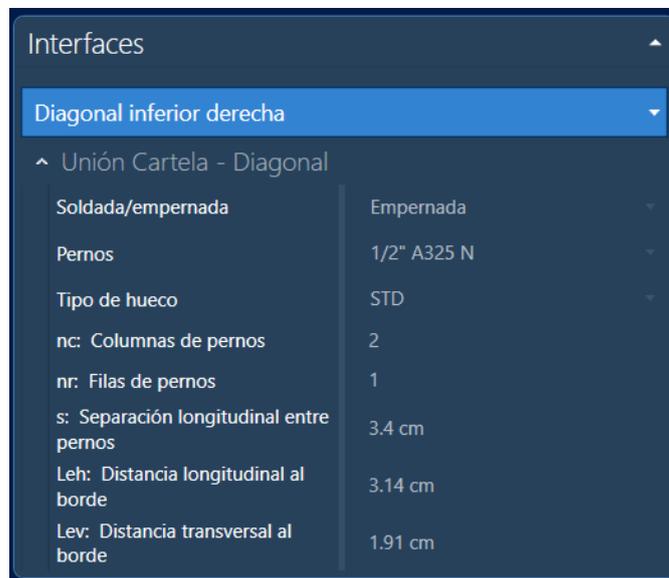
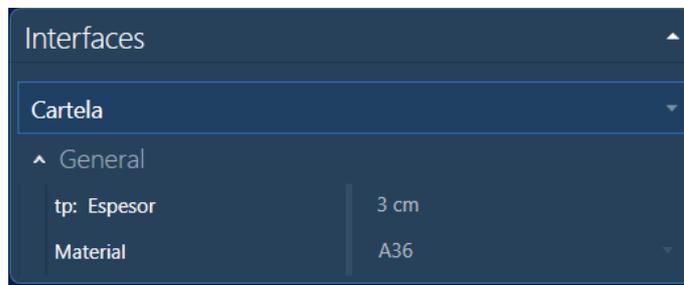
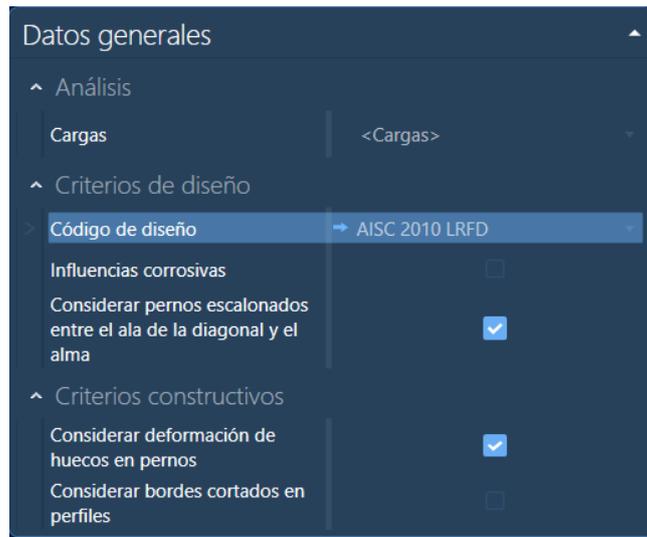
Llegar a simular las diagonales de la torre, primero se debe elegir el tipo de unión de diagonales, el cual se escogió el tipo VXB para, y elegimos el tipo de perfil el cual es L35X34X3 para cada diagonal, el tipo de material es el A36, a continuación, se indica en la Figura 48 la configuración de cada perfil.



**Figura 48.** Configuración de tipos de perfiles.

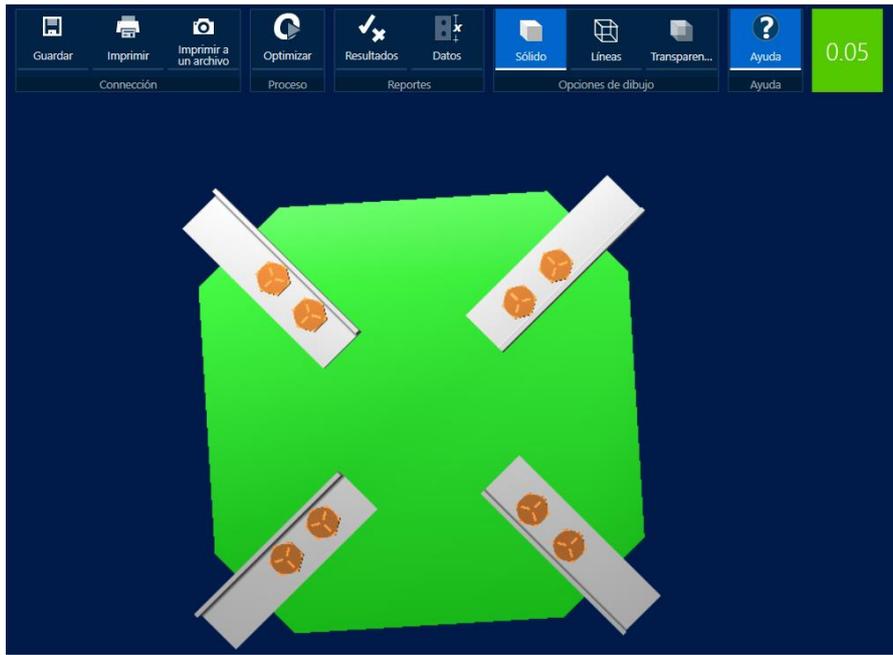
Luego se coloca las cargas de cada sección tanto de compresión y tensión, como se indica en la Figura 49, estos valores fueron obtenidos en la simulación mediante software especializado, los cuales se indican en el capítulo de resultados. Se debe tener en cuenta que las unidades están en toneladas.





**Figura 51.** Edición de conexiones, dimensionamiento de placa y pernos.

A continuación, se indica en la Figura 52 el diseño de la placa, perfiles y pernos, el cual será evaluado y verificado si cumple con los estándares mínimos.



**Figura 52.** Diseño de conexión.

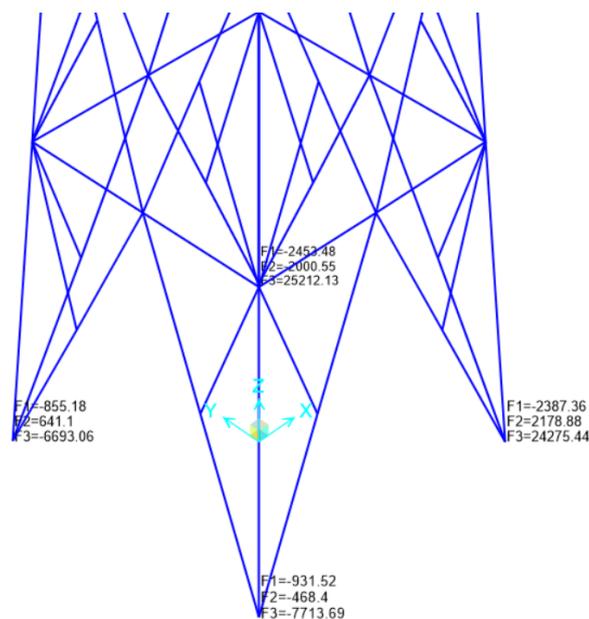
## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

Los resultados principales son la validación de conexiones, tanto en cargas como en dimensionamiento. Para ello se efectúa los resultados obtenidos mediante software especializado, primero se verifica que la torre cumpla y no colapse, luego que no esté sobredimensionado, verificar según la norma ASCE que la estructura este dentro del rango permisible bajo los desplazamientos ocurridos por el viento, para finalmente registrar los esfuerzos de cada elemento y poder realizar el mejor tipo de conexión y no sufra colapsos por uniones.

#### 4.1. Validación mediante simulación torre

En la Figura 53 se indica las reacciones en cada punto, los cuales sirven en el caso de estudio para un análisis de cimentación.



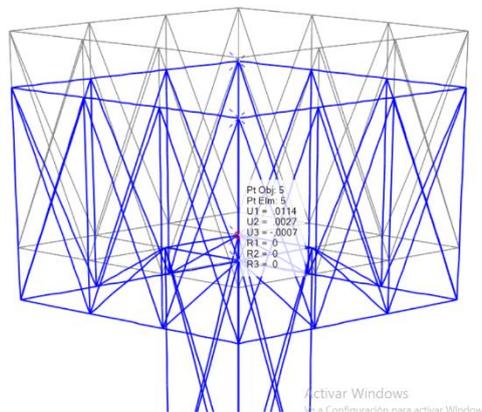
**Figura 53.** Reacciones.

En la Tabla 7 se encuentran especificados las reacciones para la cimentación, sus valores están dados por los tres ejes principales.

**Tabla 7.** Reacciones de la torre.

<b>Nodos</b>	<b>Fx [N]</b>	<b>Fy[N]</b>	<b>Fz[N]</b>
<b>40</b>	-855.18	641.1	-6693.06
<b>42</b>	-931.52	-468.4	-7716.69
<b>43</b>	-2387.36	2176.88	24275.44
<b>46</b>	-2453.48	-2000.55	25212.13

El desplazamiento se revisa considerando la altura más alta ya que mientras más alto es se ejerce mayor presión de viento, por lo tanto, en la Figura 54 se indica donde se está tomando el punto de desplazamiento más alto.



**Figura 54.** Punto de desplazamiento más alto.

Las torres auto soportadas, según el manual de obras civiles CFE-2008 indica que debe cumplir lo siguiente, acerca del desplazamiento, donde interviene la altura (H) y el desplazamiento ( $\Delta$ ) que indica el software.

$$\Delta \leq H \cdot \tan(0.75) \quad (37)$$

$$0.0114m \leq 20m \cdot \tan(0.75)$$

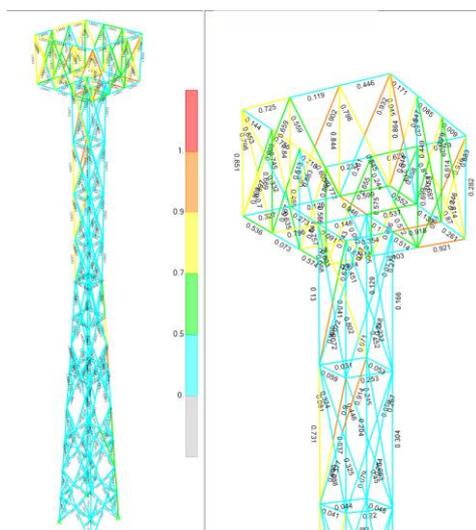
$$0.0114m \leq 0.26m$$

Por lo tanto, si cumple, a continuación, en la Tabla 8 se indica dos puntos de la parte más alta con sus respectivos desplazamientos en todos sus ejes.

**Tabla 8.** Reacciones de la torre.

Nodos	dx [m]	dy[m]	zz[m]
7	0.0114	0.0023	-0.0005
8	0.0114	0.003	-0.0002

En la Figura 55 se indica con un rango de colores, las ratios y sus respectivos elementos, la norma ASCE, nota que la ratio de los elementos debe ser menor que 1. Bajo varias iteraciones del programa se llegó al mejor resultado.



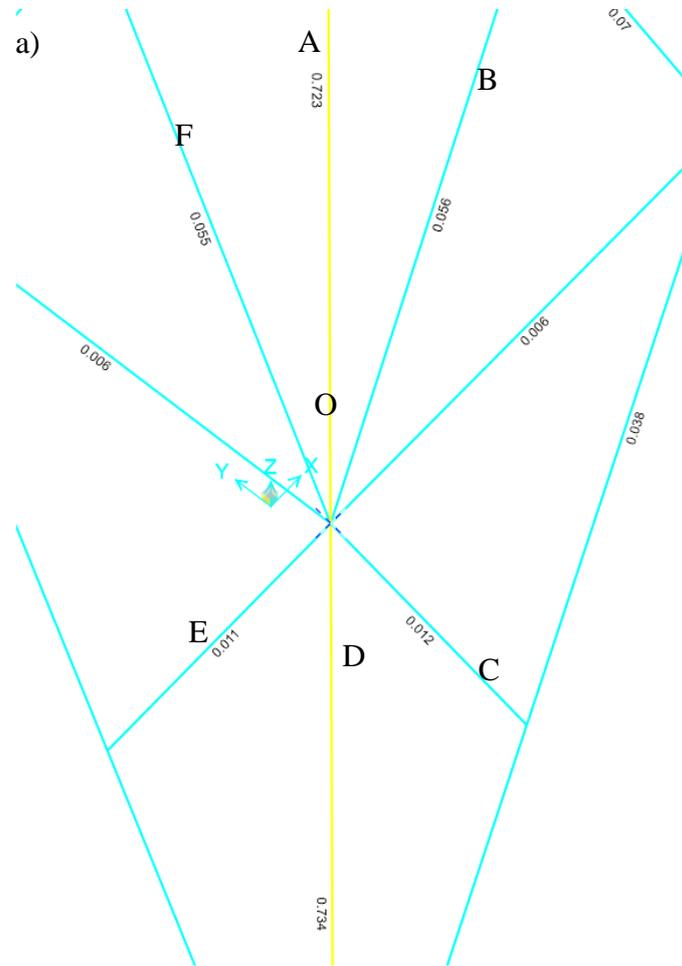
**Figura 55.** Escala de la ratio de cada elemento,

A continuación, en la Tabla 9 se indica los perfiles tipo L y los esfuerzos de cada elemento, que serán usados para el cálculo de las conexiones emperradas en los dos principales puntos, conexión de diagonales y conexión de montantes.

**Tabla 9.** Perfiles y esfuerzos

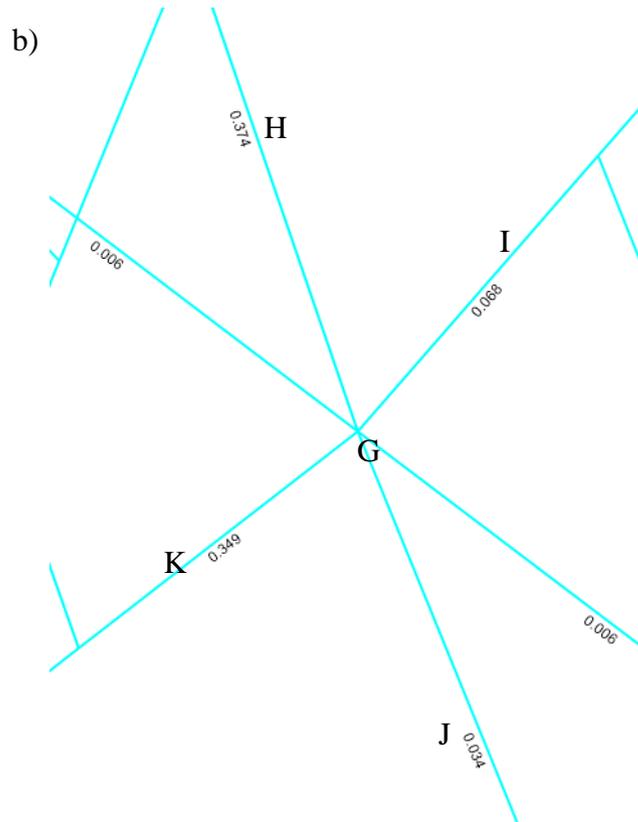
Conexión	Elemento	Perfil	Fuerza normal [KN]
Conexión de montantes	OA	L55X6	76.6760
	OB	L35X3	-1.3289
	OC	L35X3	1.7623
	OD	L35X3	69.4820
	OE	L55X6	1.7678
	OF	L35X3	-1.2598
	GH	L35X3	-1.3804
Conexión de diagonales	GI	L35X3	-2.1864
	GJ	L35X3	-1.4866
	GK	L35X3	-2.3899

En la Figura 56 se muestra la configuración de los elementos a conectar entre diagonales y montantes, donde se aprecian los ratios de cada elemento a unir, el cual se identifica como los perfiles correctos.



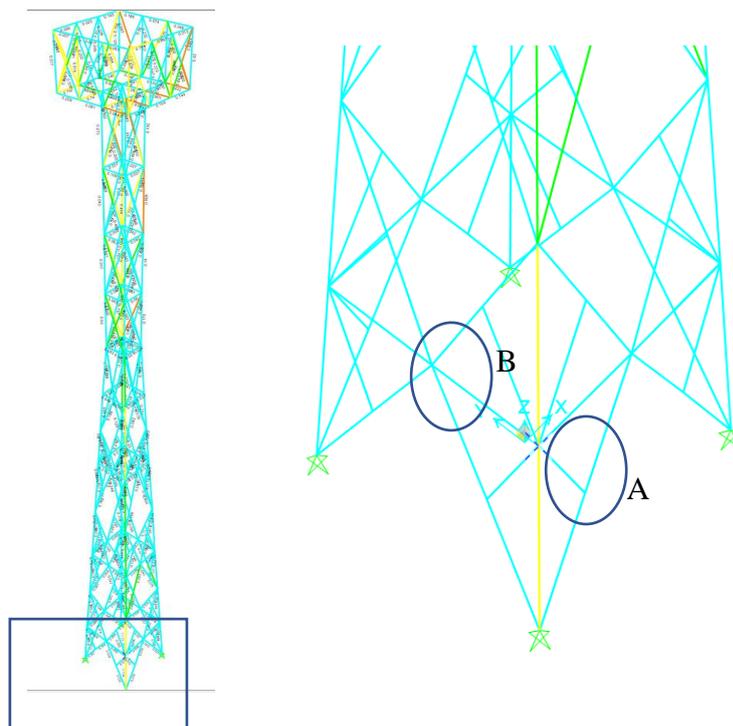
**Figura 56.** Unión de montante y diagonales.

A continuación, se indica en la Figura 57 la conexión entre diagonales, de igual manera se aprecia las ratios de cada elemento.



**Figura 57.** Unión de diagonales

Cuando se obtiene el tipo de perfil y los esfuerzos de cada elemento, ya se puede iniciar con las conexiones solicitadas, las cuales se indica en la Figura 58, donde A es la conexión de montantes y B es la conexión de diagonales.



**Figura 58.** Conexiones montantes y diagonales

## 4.2. Validación mediante simulación conexiones

Se valida las conexiones que se dieron mediante el diseño en software especializado, la validación se hace para los montantes y las diagonales mediante la verificación de la resistencia al corte y al aplastamiento.

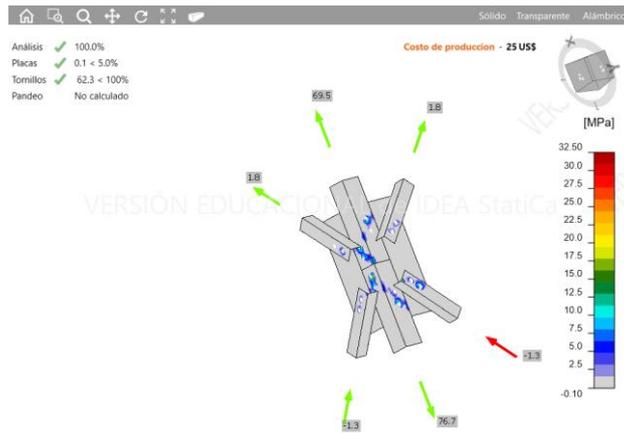
### 4.2.1. Simulación de Montantes

En este apartado se verifica los cálculos manuales con la simulación generado en software especializado, en la Figura 59 se indica el resumen del análisis, placas y tornillos, los cuales se puede notar que marcan el OK del sí cumple.



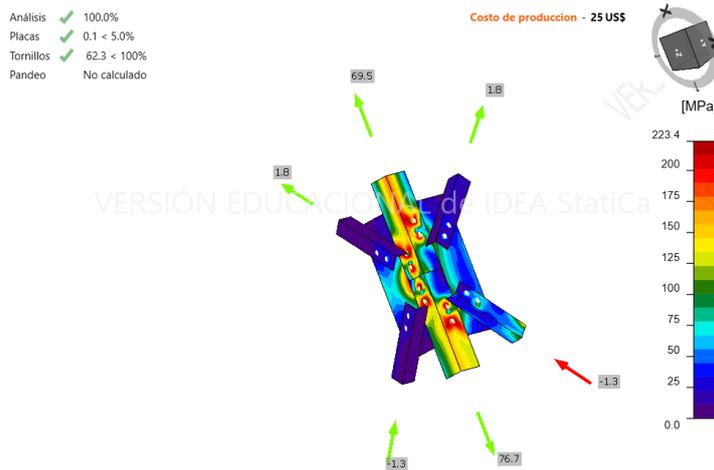
Figura 59. Resumen de análisis.

A continuación, se puede observar en la Figura 60 que la tensión de contacto entre elementos y placa, el cual, visualmente existe una tensión máxima de 32.5 MPa.



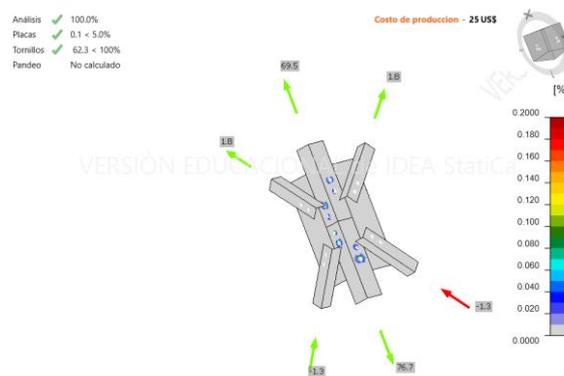
**Figura 60.** Resultado de tensión de contacto

Luego en la Figura 61 está la tensión equivalente con un máximo de 223.4 MPa por debajo del límite elástico del acero A36 de 248.2 MPa.



**Figura 61.** Resultados de tensión equivalente

Luego se indica en la Figura 62 la deformación plástica el cual es 0.1 % menor al 5 % por lo tanto si cumple.



**Figura 62.** Deformación plástica.

En la Figura 63 se muestra la resistencia al aplastamiento de la chapa provocado por el tornillo, en cada elemento, la resistencia de los pernos a tracción y a cortante.

Tornillos

Forma	Ítem	Calidad	Cargas	$F_t$ [kN]	$V$ [kN]	$\phi R_{n,portante}$ [kN]	$U_t$ [%]	$U_s$ [%]	$U_{ts}$ [%]	Estado
	B1	12 A325M - 1	LE1	1.0	19.6	38.4	1.8	62.3	-	OK
	B2	12 A325M - 1	LE1	4.9	19.6	38.4	9.4	62.2	-	OK
	B3	12 A325M - 1	LE1	0.3	17.1	38.4	0.6	54.4	-	OK
	B4	12 A325M - 1	LE1	4.1	17.0	38.4	7.9	53.8	-	OK
	B9	12 A325M - 1	LE1	0.5	1.0	16.2	1.0	6.0	-	OK
	B10	12 A325M - 1	LE1	0.9	0.9	16.2	1.7	5.8	-	OK
	B11	12 A325M - 1	LE1	0.9	2.0	16.2	1.8	12.4	-	OK
	B12	12 A325M - 1	LE1	3.0	3.3	14.1	5.7	23.4	-	OK
	B5	12 A325M - 1	LE1	4.1	18.8	34.3	7.9	59.7	-	OK
	B6	12 A325M - 1	LE1	3.4	18.8	34.3	6.4	59.6	-	OK
	B7	12 A325M - 1	LE1	2.0	17.7	34.3	3.9	56.2	-	OK
		B8	12 A325M - 1	LE1	3.8	17.8	34.3	7.3	56.6	-
B13		12 A325M - 1	LE1	0.8	0.6	16.2	1.5	4.0	-	OK
B14		12 A325M - 1	LE1	0.8	0.6	16.2	1.6	4.0	-	OK
B15		12 A325M - 1	LE1	1.3	1.0	22.5	2.4	4.7	-	OK
B16		12 A325M - 1	LE1	0.1	1.0	24.3	0.1	4.2	-	OK

Datos de diseño

Calidad	$\phi R_{n,tracción}$ [kN]	$\phi R_{n,cortante}$ [kN]
12 A325M - 1	52.5	31.5

**Figura 63.** Resistencia al aplastamiento, de los pernos por tracción y a cortante

Los valores obtenidos mediante el cálculo manual de la resistencia al corte, al aplastamiento y a la fractura son de 32.39, 51.2 y 38.34 KN respectivamente, y los obtenidos mediante la simulación son de 31.5, 52.5 y 38.4 KN respectivamente, los cuales existe un margen de error para cada uno, resistencia a corte del 2.82 %, resistencia al aplastamiento del 2.47 % y de la resistencia a la fractura del 0.15 %.

#### 4.2.2. Simulación de diagonales

Mediante la hoja de cálculo se obtiene la validación de los resultados tanto del dimensionamiento, la resistencia a corte, y aplastamiento. En la Figura 64 se indica las cargas en cada sección, como verificación de las cargas a tensión y compresión.

SOLICITACIONES

Descripción	$P_u$				Tipo de carga
	Diagonal1 [Ton]	Diagonal2 [Ton]	Diagonal3 [Ton]	Diagonal4 [Ton]	
DL	-0.22	-0.15	-0.24	-0.14	Design

**Figura 64.** Solicitaciones de cargas.

En la Figura 65 se muestra el chequeo de las consideraciones geométricas para el esfuerzo más grande donde es de 0.22 Ton a compresión, el cual se puede observar que el visto en verde indica que si cumple los estándares de dimensionalidad.

SOLICITACIONES			Conexión: Directamente emperrada				
Pu	Descripción	Tipo de carga					
[Ton]							
-0.24	DL	Design					

CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS						
Dimensiones	Unit	Value	Min. value	Max. value	Sta.	References
Directamente emperrada						
Distancia transversal al borde	[cm]	1.91	1.90	--	✓	Tables J3.4, J3.5
Separación transversal entre pernos	[cm]	3.40	3.39	7.20	✓	Sec. J3.3, Sec. J3.5
Distancia longitudinal al borde	[cm]	3.14	1.90	--	✓	Tables J3.4, J3.5
Separación longitudinal entre pernos	[cm]	3.40	3.39	7.20	✓	Sec. J3.3, Sec. J3.5

Figura 65. Chequeo de consideraciones geométricas.

Luego en la Figura 66 se indica la verificación de diseño mediante corte en los pernos y aplastamiento de pernos por corte.

VERIFICACIÓN DE DISEÑO						
Verification	Unit	Capacity	Demand	Ctrl EQ	Ratio	References
Corte en los pernos	[Ton]	7.20	0.24	DL	0.03	Tables (7-1..14)
Aplastamiento de pernos por corte	[Ton]	4.84	0.24	DL	0.05	Eq. J3-6

Figura 66. Verificación de diseño.

Por lo tanto, se indica que la ratio máxima es de 0.05 como valor exacto, el cual comparando con la ratio calculada que es de 0.046 como valor aproximado, da un porcentaje de error del 8 %.

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se indica la comparación de la resistencia al corte y al aplastamiento de las conexiones a montantes y diagonales

Tipo de conexion	Calculado		Simulación	
	$Rn_{corte}$ [kN]	$Rn_{aplast}$ [kN]	$Rn_{corte}$ [kN]	$Rn_{aplast}$ [kN]
Conexion por montantes	32.39	51.2	31.5	52.5
Conexion por diagonales	32.39	25.6	35.30	23.73

Tabla 10. Resultados de esfuerzos

La

**Tabla 11** es el resultado de los errores en porcentaje entre el software especializado y los cálculos analíticos que existe entre las resistencias a corte y al aplastamiento con respecto a los dos tipos de conexiones, se toma como valor exacto al de la simulación y el valor aproximado al calculado.

**Tabla 11.**Resultados de esfuerzos.

<b>Tipo de conexión</b>	<b>Error %</b>	
	<i>Rn<sub>corte</sub></i>	<i>Rn<sub>aplast</sub></i>
<b>Conexion por montantes</b>	2.88	2.47
<b>Conexion por diagonales</b>	8.24	7.88

## CONCLUSIONES.

- Se establece una torre de telecomunicaciones auto soportada, con una altura de 20 metros, que son empernadas en la mayoría de la estructura, las cuales constan de tres partes. La base formada por una estructura piramidal, seguida por una sección constante rectangular y en la parte superior una sección cuadrada. La cual está ubicada en la ciudad de Quito, a 2850 metros sobre el nivel del mar, tomando en cuenta la velocidad de 10km/h utilizados para los cálculos de cargas vivas y muertas.
- El diseño realizado en el software y en base a la norma AISC 360-16, en general indica los siguientes parámetros de la placa: los pernos son de 12 mm sujetadas por tuercas de material Acero A325, la distancia transversal al borde 19.1mm la separación transversal y longitudinal entre pernos es 34 mm, la distancia longitudinal al borde 31.4mm por 2 pernos en cada sección; los cuales cumplen al ser expuestos a las cargas generadas.
- La torre va a soportar cargas vivas de dos tipos de antenas, 15 antenas de tipo RF, que están ubicadas en dos secciones de la estructura, 9 establecidas en la parte superior de la sección cuadrada, y 6 a 14 metros desde la base. Dos antenas tipo MW ubicadas a 10 metros de altura. El peso total de las antenas de la torre da como resultado una carga de 7921,58 N, considerando la gravedad como factor.
- En base de todas las cargas combinadas propuestas y realizadas en el software especializado y en base a la norma AISC 360-16, se observa que el desplazamiento de torre no debe exceder de los 0.26 m, lo cual el desplazamiento de toda la torre resulta en 0.0114 m cumpliendo dentro de los estándares del manual de obras civiles CFE-2008. Respecto a las cargas generadas en la placa de los elementos B1, D1, D2, B2, D3, D4; con cargas de 76.7, 1.3, 1.3, 69.5, 1.8, 1.8 KN respectivamente y en equilibrio el software nos indica OK refiriendo que esta cumple y con un resultado de deformación plástica de 0.1% no excede al 0.5%.
- Los resultados se obtuvieron dentro de los cálculos analíticos realizados de la montante-montante de las cargas de la resistencia la corte, al aplastamiento y la fractura son de 32.39, 51.2 y 38.34 kN respectivamente, a comparación con los valores arrojados mediante el software de simulación fueron de 31.5, 52.5, 38.4 KN por ende, se estableció un porcentaje de error de 2.82% en la resistencias del corte, un valor de error del 2.47 % en el aplastamiento y finalmente el error del

0.15 % en la fractura, entendiendo que el programa y los cálculos tienen valores referenciales.

## RECOMENDACIONES

- Este trabajo tiene como finalidad presentar una propuesta de validar juntas empernadas sometidas a distintas cargas de diseño, las cuales se establecen como primer punto en un software de simulación, permitiendo desarrollar en su totalidad una recreación similar a una torre de 20 metros de telecomunicaciones, obteniendo las cargas significativas a las cuales está sometida la torre, para consecuentemente realizar los cálculos analíticos y validarlos mediante el programa “RAM Connection”.
- Los factores en relación de la ubicación, viento, peso del material, influyen de manera considerable en la deformación de la estructura, por ende, se realizó la investigación necesaria mediante el manual de ASTM (A325), determinando el mejor material y más acorde para esta armadura es el acero comercial A36, con perfiles de tipo L.
- La simulación realizada mediante el programa “Ram Connection”, permitió observar mejor los valores semejantes a los calculados analíticamente, con un margen de error de 8%, a comparación de otro programa este software es muy limitado, ya que tiene conexiones establecidas, lo cual nos impide realizar otros tipos diferentes de conexiones estructurales.



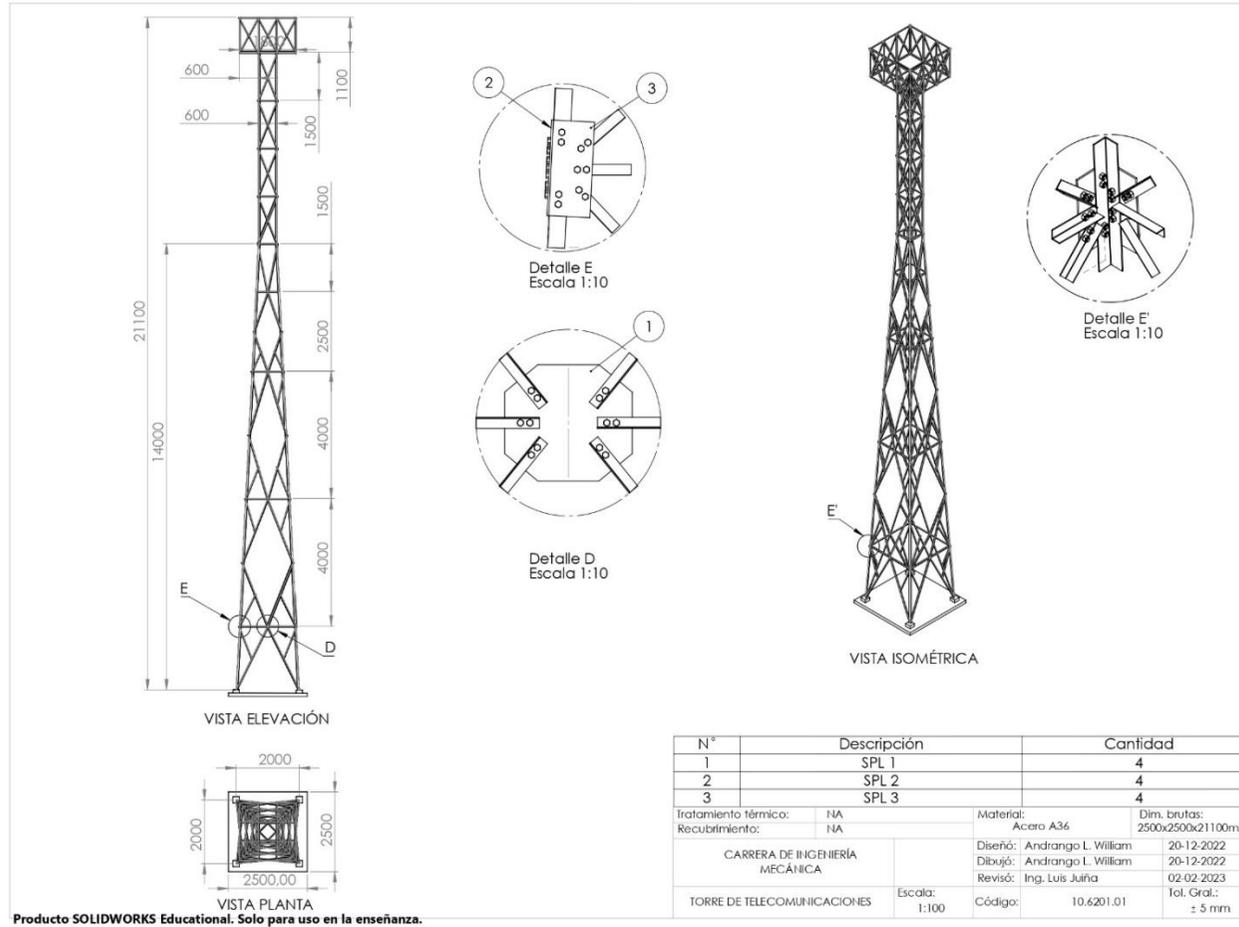
- monopile offshore wind turbines to seismic,» *Computers and Geotechnics*, vol. 155, n° 105210, 2023.
- [13] W. C. P. W. M. H. E. N. J. Z. Z. L. Xinglei Cheng, «Response of offshore wind turbine tripod suction bucket foundation to seismic and environmental loading,» *Ocean Engineering*, vol. 257, n° 111708, 2022.
- [14] S. G. Solomon Abebe, «Numerical study on effect of constant and variable axial loads on RC column subjected to blast load,» *Heliyon*, vol. 8, n° 1681, 2022.
- [15] R. C. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, México: Pearson, 2017.
- [16] L. X. W. G. Jiakai Zhu, «The influence of bending loading on surface fatigue crack growth life,» *International Journal of Fatigue*, vol. 167, n° 107285, 2023.
- [17] R. F. Morales, «Deformaciones de las estructuras,» *Revista de la Universidad de Mendoza*, n° 17, 2013.
- [18] A. S. S.-P. A. A.-L. J. M. S.-M. A. B.-S. Yazmin E. Hernández-Sánchez, «Torsión, esfuerzos y deformaciones,» *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, vol. 8, n° 16, 2021.
- [19] D. A. R. Carlos Humberto Galeano Urueña, «APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DE LA ANALOGÍA DE LA MEMBRANA EN LA DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS GENERADOS EN LA TORSIÓN DE BARRAS DE SECCIÓN NO CIRCULAR.,» *Scientia et Technica*, vol. 1, n° 21, pp. 65-70, 2003.
- [20] J. Martínez Escondrillas, «Repositorio Digital,» 06 2018|. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10317/7314>. [Último acceso: 04 01 2023].
- [21] A. Soto Juárez, «Repositorio Facultad de Ingeniería,» 1996. [En línea]. Available: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/14173>. [Último acceso: 08 01 2023].
- [22] Z. Z. L. H. L.-h. T. Chao Wu, «Experimental study on the static and fatigue performances of GFRP-timber bolted connections,» *Composite Structures*, vol. 304, pp. 1-9, 2023.
- [23] J. S. AROCHA, «PROYECTO DE CONEXIONES DE VIGAS DE ACERO A MUROS DE CONCRETO EN ESTRUCTURAS MIXTAS,» 04 2012. [En línea]. Available: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS3846.pdf>. [Último

- acceso: 02 01 2023].
- [24] V. C. Guachón, «BIBDIGITAL,» 20 08 2014. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8497>. [Último acceso: 02 01 2023].
- [25] X. F. X. Y. Q. Z. K. W. D. L. Song Wang, «Feasibility of ZrC-W composite used as a tool of friction stir welding: First principles calculations and experiment,» *Ceramics International*, vol. 44, pp. 18650-18655, 2018.
- [26] D. Ramírez, Manual de mantenimiento de torno convencional y aplicación algunos tipos de soldadura, Madrid: ECORFAN, 2015.
- [27] M. Z. J. G. H. C. X. Y. Y. L. Zhifeng Liu, «Experimental study on performance characterization of bolted joint under transverse loading,» *Measurement*, vol. 182, p. 109608, 2021.
- [28] J. H. a. Z. H. X. Y. S. W. Y. Z. B. W. Y. O. J. Z. Xiping Li a, «High strength carbon-fiber reinforced polyamide 6 composites additively manufactured by screw-based extrusion,» *Composites Science and Technology*, vol. 229, p. 109707, 2022.
- [29] S. F. C. JACK C. McCORMAC, Diseño de Estructuras de Acero, México: Alfaomega Grupo Editor, 2012.
- [30] A. R. D. Salambay, «Repositorio Digital de la Universidad Técnica de Ambato,» 05 2015. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/11817>. [Último acceso: 05 01 2023].
- [31] A. T. F., «Diseño de edificios altos por cargas de viento.,» 2015. [En línea]. Available: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8348>. [Último acceso: 06 01 2023].
- [32] J. J. MUÑOZ GUERRA, «Acceso Libre a Información Científica para la Innovación,» 2013. [En línea]. Available: <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/4189>. [Último acceso: 06 01 2023].
- [33] A. F. G.-R. N. A. Arias-Cantor, Guía de diseño estructural de torres de telecomunicaciones auto soportadas en Colombia para alturas de 20, 30 y 40 metros, Bogotá: ACA. Pregrado Civil, 2019.
- [34] I. H. Sebastián, Evaluación de la eficiencia y distorsión en amplificadores de RF con carga dinámica de antena en dispositivos móviles, Zaragoza: Repositorio de la

Universidad de Zaragoza, 2015.

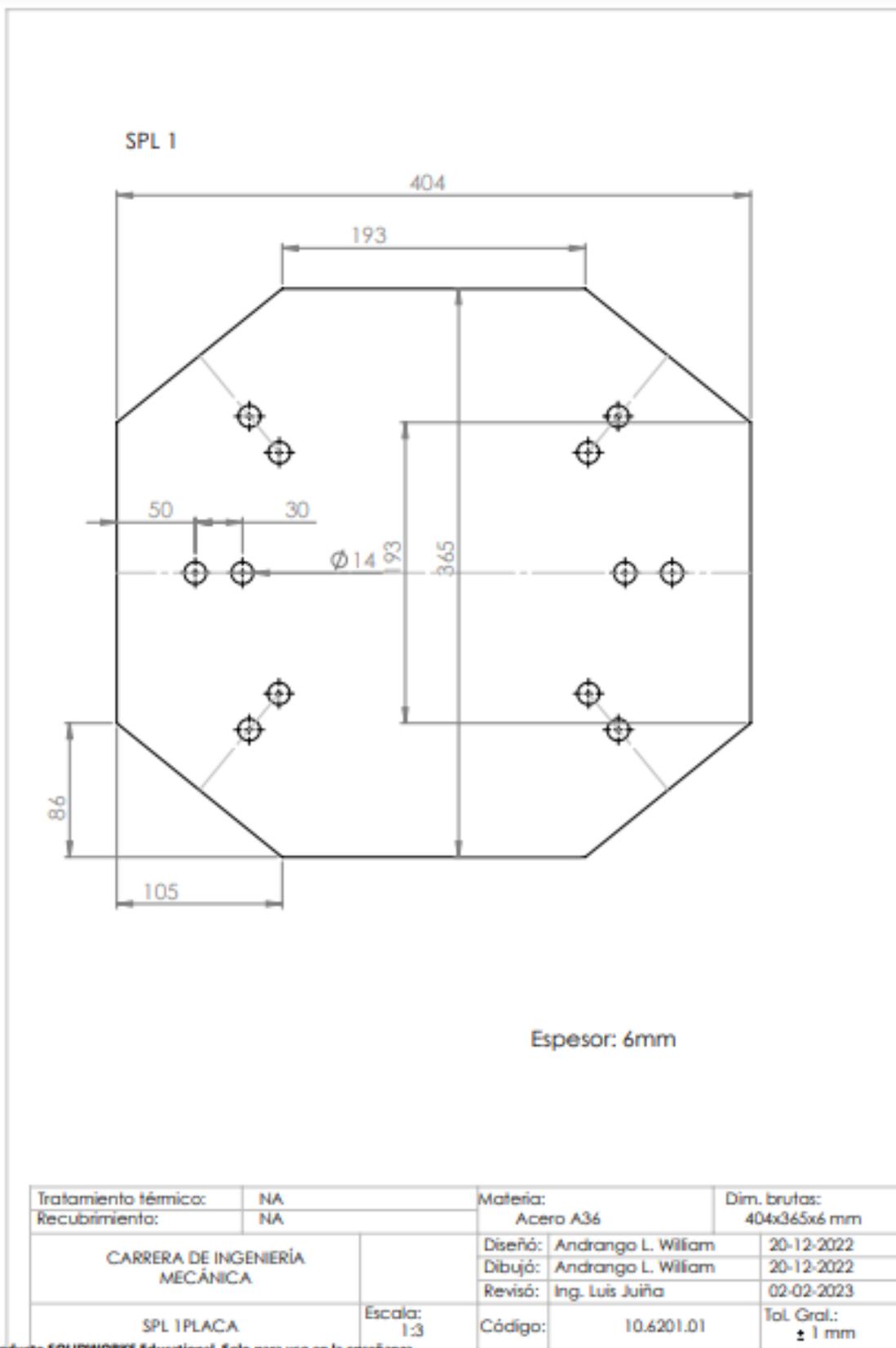
- [35] S. J. A. H. U. M. Salih. N, «An Experimental Appraisal of the Load-Deformation Properties of A325 High-Strength Bolts,» *ASTM International*, vol. 26, nº 6, 1992.
- [36] A. G. Lladós, ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ ESTRUCTURAL DE CONEXIONES EN EL DIMENSIONADO DE ACRISTALAMIENTOS, Madrid, 2017.
- [37] M. E. S. Ponciano, DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIÓN AUTOSOPORTADA CUADRANGULAR DE 120 M - YURIMAGUAS 2014, HUÁNUCO, 2015.

## ANEXOS

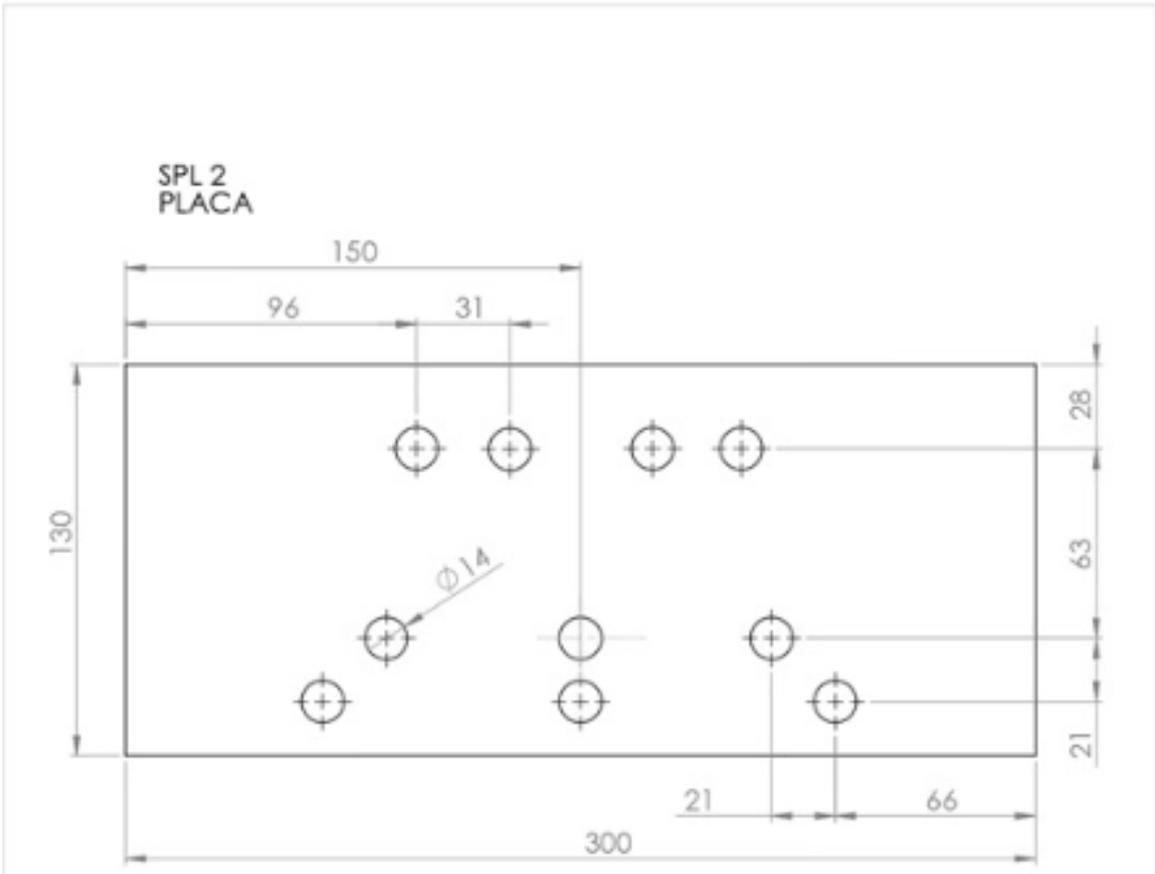


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**Anexo 1. Plano de la Torre.**



Anexo 2. Placa 1.



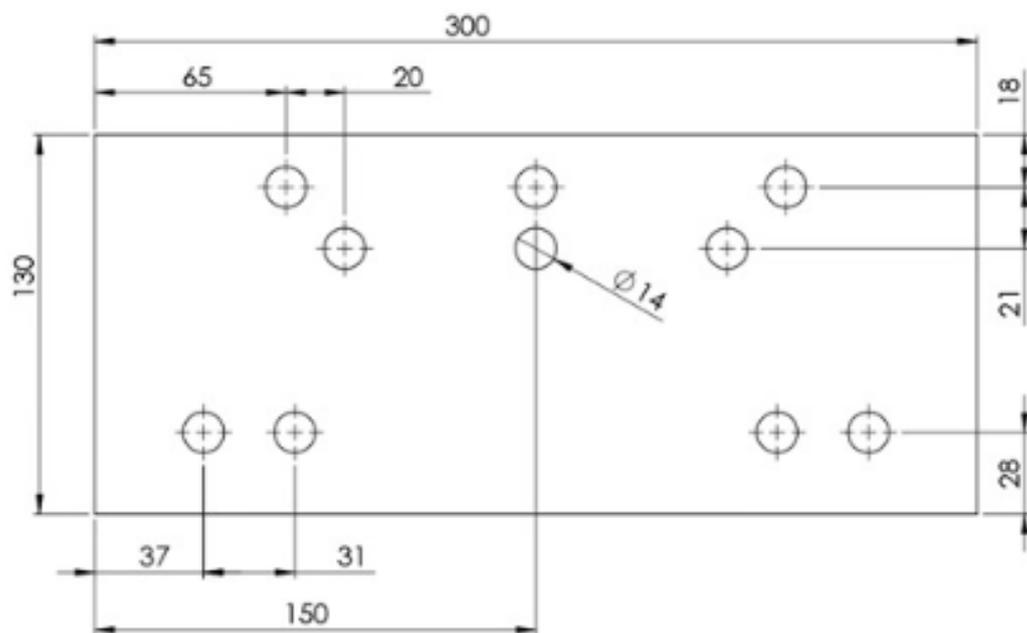
Espesor: 6mm

Tratamiento térmico:	NA	Materia:	Acero A36	Dim. brutas:	300x130x6 mm
Recubrimiento:	NA				
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñó:	Andrango L. William	20-12-2022	
		Dibujó:	Andrango L. William	20-12-2022	
		Revisó:	Ing. Luis Juliña	02-02-2023	
SPL 2 PLACA		Escala:	1:2	Código:	10.6201.01
				Tol. Graf.:	± 1 mm

ducto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Anexo 3. Placa 2.

SPL 3  
PLACA



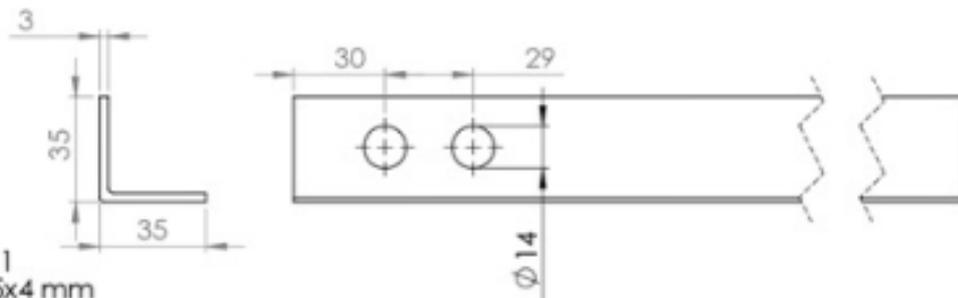
Espesor: 6mm

Tratamiento térmico:	NA	Materia:	Acero A36	Dim. brutas:	300x130x6 mm
Recubrimiento:	NA				
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Diseño:	Andrango L. William	20-12-2022	
		Dibujó:	Andrango L. William	20-12-2022	
		Revisó:	Ing. Luis Juliña	02-02-2023	
SPL 3 PLACA		Escala:	1:2	Código:	10.6201.01
				Tol. Gral.:	± 1 mm

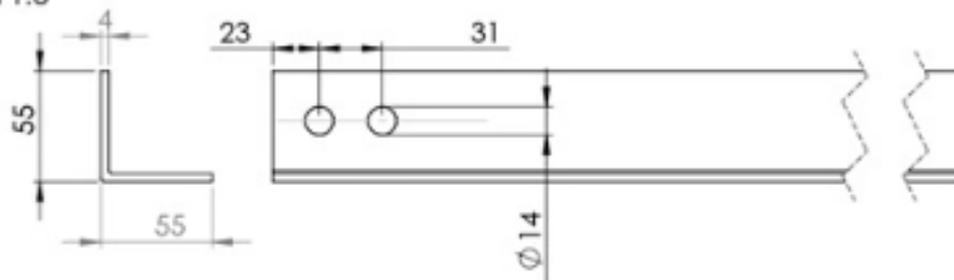
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Anexo 4. Placa 3.

Perfil 1  
35x35x3 mm  
Escala 1:2



Perfil 1  
55x55x4 mm  
Escala 1:3



Tratamiento térmico:	NA	Materia:	Acero A36	Dim. brutas:
Recubrimiento:	NA			
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñó:	Andrango L. William	20-12-2022
		Dibujó:	Andrango L. William	20-12-2022
		Revisó:	Ing. Luis Juiña	02-02-2023
Perfiles	Escala:	Código:	10.6201.01	Tol. Gral.: ± 1 mm

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

### Anexo 5. Perfiles.