



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA LOS PROCESOS
DE DISEÑO DE CONEXIONES TUBULARES
PERNADAS DE ESTRUCTURAS EN ACERO**

Autor
Pablo Hurtado Henao

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020



HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA LOS PROCESOS DE DISEÑO DE
CONEXIONES TUBULARES PERNADAS DE ESTRUCTURAS EN ACERO

Pablo Hurtado Henao

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil

Asesores:

Yenni Mariana Ramírez Mazo, Ingeniera civil
Leonardo Novoa Fernández, Ingeniero civil

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020

Contenido

Resumen	5
1. Introducción	6
2. Objetivos	7
2.1. Objetivo General.....	7
2.2. Objetivos Específicos	7
3. Marco teórico	7
3.1. Sistemas estructurales.....	7
3.1.1. Sistema de muros de carga.....	8
3.1.2. Sistema de pórticos	8
3.1.3. Sistema dual.....	10
3.1.4. Sistema combinado	10
3.1.5. Torres de telecomunicaciones.....	11
3.1.5.1. Torres atirantadas	11
3.1.5.2. Torres monopolo	12
3.1.5.2.1. Bridas estructurales.....	13
3.1.5.3. Torres autoportadas	14
3.2. Tipos de secciones metálicas más comunes	15
3.3. Software de apoyo más conocido	16
3.4. Materiales	16
4. Metodología	17
4.1. Capacitación en análisis dinámico y estructuras en acero.	17
4.2. Recopilación de información técnica y normativa vigente requerida para el diseño de estructuras en acero.	17
4.2.1. Importancia de la NSR-10	17
4.2.2. Otros códigos de diseño considerados:	18
4.2.3. Cálculo de las cargas para los métodos LRFD y ASD	18
4.3. Realización de visitas técnicas a la planta de la empresa para identificar los procesos y diferentes geometrías de las secciones y conexiones disponibles para la construcción... 18	
4.4. Planteamiento de escenarios de funcionamiento, especificaciones de diseño y/o combinaciones de carga de la estructura.	19
4.4.1. Solicitaciones sismo resistentes:	19
4.4.2. Solicitaciones de cargas eólicas:	19
4.4.3. Solicitación de cargas axiales	19
4.5. Generación de hojas de cálculo del diseño de las conexiones según el diseño global de las estructuras a considerar.	19
4.5.1. Bridas sometidas a tensión pura.....	20
4.5.2. Bridas sometidas a estados de tensión, cortante y flexión	20

4.5.2.1.	Resistencia de los pernos.....	20
4.5.2.2.	Resistencia de los rigidizadores:	20
4.5.2.3.	Resistencia de la platina	20
4.6.	Puesta en marcha, verificación y ajustes en el funcionamiento de las herramientas de cálculo.	20
4.7.	Documentación de las memorias de cálculo y recomendaciones para el diseño.....	21
5.	Implementación y análisis de los resultados	21
5.1.	Capacitación en análisis dinámico y estructuras en acero.	21
5.2.	Recopilación de información técnica y normativa vigente requerida para el diseño de estructuras en acero.	22
5.2.1.	Tipo de investigación: Descriptiva	22
5.2.2.	Método: Mixto	23
5.2.3.	Importancia de la NSR-10	23
5.2.4.	Importancia de la ANSI	23
5.2.5.	Combinaciones de carga método LRFD	24
5.2.6.	Combinaciones de carga Método ASD.....	25
5.2.6.1.	Resistencia de los pernos.....	25
5.3.	Realización de visitas técnicas a la planta de la empresa para identificar los procesos y diferentes geometrías de las secciones y conexiones disponibles para la construcción...	28
5.3.1.	Evidencias fotográficas	28
5.4.	Planteamiento de escenarios de funcionamiento, especificaciones de diseño y/o combinaciones de carga de la estructura.	29
5.4.1.	Solicitaciones sismo resistentes:	29
5.4.2.	Solicitaciones de cargas eólicas:	30
5.4.3.	Solicitud de cargas axiales	31
5.4.4.	Perfiles utilizados.....	32
5.4.5.	Materiales.....	32
5.4.6.	Solicitaciones	33
5.5.	Generación de hojas de cálculo del diseño de las conexiones según el diseño global de las estructuras a considerar.	33
5.5.1.	Bridas sometidas a tensión pura.....	33
5.5.2.	Bridas sometidas a estados de tensión, cortante y flexión	34
5.5.2.1.	Resistencia de los rigidizadores:	35
5.5.2.2.	Resistencia de la platina	35
5.5.2.3.	Ecuaciones.....	36
5.5.2.4.	Resistencia de los pernos.....	40
5.5.2.5.	Resistencia de los rigidizadores	40
5.5.2.6.	Resistencia de la brida.....	41

5.6. Puesta en marcha, verificación y ajustes en el funcionamiento de las herramientas de cálculo.	41
6. Conclusiones	47
7. Referencias bibliográficas	48

Resumen

La empresa INSTALCOM S.A.S ofrece dentro de su portafolio de servicios, la fabricación de estructuras metálicas desde hace más de una década, al inicio de su fundación construía únicamente torres de telecomunicaciones arriostradas, mono polos o auto soportadas contratando los diseños estructurales a terceros. El diseño estructural es un área que recientemente se añadió a sus servicios, por ese motivo la empresa busca desarrollar y generar análisis y diseños estructurales propios.

Con el objetivo de utilizar una herramienta de cálculo propia y mejorar el costo total de la fabricación e instalación de monopolos de la empresa hacia el mercado, se desarrolló una hoja de cálculo que permite establecer dimensiones de las conexiones de torres monopolos y garantizar su estabilidad y serviciabilidad.

Para esto se acudió a la investigación descriptiva, con método mixto (cualitativo-cuantitativo) para la recopilación de información técnica y normativa vigente requerida, se plantearon diferentes escenarios de funcionamiento de las estructuras (combinaciones de carga), y se generaron las herramientas de cálculo utilizando ecuaciones de estimación de las dimensiones de conexiones tipo brida dispuestas en los códigos de diseño.

Uno de los mayores obstáculos fue la obtención de información y bibliografía que pudiera aportar a la solución del problema, por este motivo, el diseño se realizó descomponiendo la conexión en sus elementos básicos y analizándolos como sistemas bien conocidos en la literatura. Con esta idea se obtuvo una propuesta de diseño que se comparó con las soluciones que arroja en software especializado TNX Tower y arrojó porcentajes de uso mayores al 60% para todos los componentes de la conexión.

El trabajo realizado deja como enseñanzas utilizar la estrategia de descomponer un problema en sus componentes más básicos para poder analizarlo mejor, además, siguiendo buenas prácticas de diseño, aún con valores conservadores se pueden llegar dimensiones óptimas.

Palabras clave: Herramientas de cálculo, estructuras de acero, monopolo, conexiones tubulares pernadas, brida.

1. Introducción

INSTALCOM -Instalaciones, Construcciones y Montajes- S.A.S es una empresa ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia, dedicada a soluciones integrales en diseño, fabricación y construcción de obras civiles y eléctricas en estructuras metálicas, e instalación y optimización de equipos de telecomunicaciones a nivel nacional con catorce (14) años de experiencia (INSTALCOM S.A.S., 2020).

En INSTALCOM S.A.S, se avanza en una adecuada gestión integral de los procesos con personal competente, innovación y mejoramiento continuo; afirmándose desde un conjunto de factores estratégicos que constituyen la base para competir en el mercado y que representan una garantía constante en la sostenibilidad y proyección de la organización.

Dentro de los servicios que en la actualidad se ofrecen, se encuentran el diseño, cálculo, fabricación, montaje y mantenimiento de cubiertas, fachadas, mezanines, plataformas, estructuras de soporte, edificaciones comerciales, industriales y residenciales, torres de telecomunicaciones y energía. Adicionalmente se ofrece suministro de estructura metálica con planos de ensamble, traslado y desmantelamiento de estructuras, repotenciación y refuerzo de estructuras existentes, evaluación y diagnóstico de estructuras existentes, y prestación de servicios de corte por CNC (Control Numérico Computarizado), plasma y oxicorte, doblado de láminas y perfiles, perforado y soldadura MIG-TIC (INSTALCOM S.A.S, 2015).

Anteriormente en INSTALCOM S.A.S no se contaba con personal en el área de diseño, y por tanto los diseños de estructuras (en su mayoría procesos para el sector de telecomunicaciones) eran realizados por terceros ajenos a la empresa. Desde el año 2018, INSTALCOM S.A.S empezó a contar con ingenieros en el área de diseño de estructuras y comenzó a generar sus propias memorias de cálculo, además de ampliar su oferta de servicios, fabricando nuevos tipos de estructuras metálicas y enfocándose en el mercado de obras civiles.

Por su reciente inclusión de memorias de cálculo en la base de datos de la empresa, no se cuenta con un registro robusto del diseño de estructuras diferentes a torres de telecomunicaciones ni sus conexiones. Lo anterior propicia la necesidad de que el área de diseño de la empresa se vea impactada con el desarrollo de memorias de cálculo para estructuras metálicas de forma que provea no solo el cálculo estructural, sino que facilite otras actividades propias de la empresa como son el cálculo de cantidades de material de acero para las estructuras y la verificación de resistencia en cada uno de los elementos estructurales, siendo esta última una necesidad inmediata en INSTALCOM.

De acuerdo con lo anterior, con el desarrollo de este proyecto se pretende la implementación de una herramienta de cálculo para abordar la resistencia de las conexiones pernadas entre elementos tubulares a la luz de la normatividad vigente como lo son el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente -NSR-10- y los códigos internacionales de diseño.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta de cálculo en Microsoft Excel para apoyar los procesos de modelación y cálculo de conexiones tubulares pernadas en estructuras en acero tipo monopolos de acuerdo con los métodos de diseño utilizados en INSTALCOM S.A.S.

2.2. Objetivos Específicos

- Entender el comportamiento de estructuras metálicas y su análisis dinámico.
- Reconocer los códigos y normativas de diseño de estructuras de cara a las nuevas exigencias que se presentan en el área comercial de la construcción.
- Identificar los procesos de fabricación y construcción de estructuras metálicas, así como las diferentes técnicas para llevarlos a cabo.
- Implementar verificaciones de la estabilidad de estructuras metálicas a la luz de los criterios de diseño estructural (resistencia y servicio).
- Establecer la validez de la resistencia de las conexiones pernadas de acuerdo con los criterios de diseño establecidos por la normativa vigente.
- Generar registros y actualizaciones de los chequeos realizados durante el proceso de cálculo.

3. Marco teórico

3.1. Sistemas estructurales

A continuación, se describen conceptos que aportan al entendimiento del objeto de estudio. Desde el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente -NSR-10-, el Instituto Estadounidense de estándares -ANSI- y la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles -ASCE-, se establecen diferentes métodos para el análisis y diseño estructural de una edificación: en donde el ingeniero estructural deberá seleccionar cuál de los diferentes sistemas constructivos será el más indicado dependiendo de las necesidades y especificaciones de cada proyecto. Entre los sistemas estructurales, se destacan la agrupación los siguientes tipos: el sistema de muros de carga; el sistema combinado, el sistema de pórticos, el sistema dual (Estrada, 2016), y torres de telecomunicaciones.

3.1.1. Sistema de muros de carga

Esos sistemas se soportan desde cargas verticales, y consisten en unos muros estructurales. En ellos las cargas horizontales, pueden ser resistidas por otros muros de carga o pórticos con diagonales. Es claro que los muros de carga a su vez serán los encargados de soportar otros tipos de estructuras de la edificación, entre ellos: las vigas, las bóvedas y los arcos (Estrada, 2016).

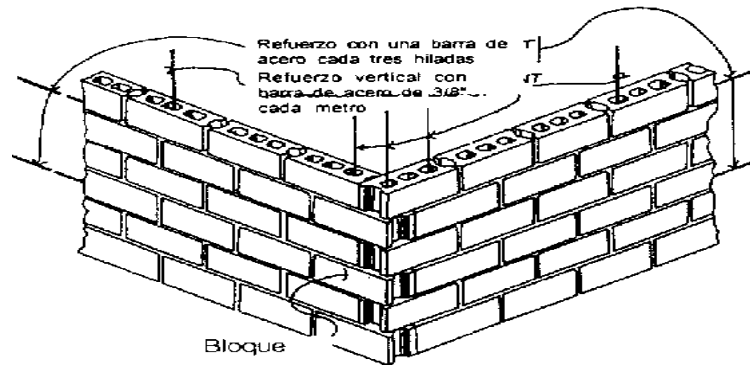


Imagen 1. Esquema de muro portante o muro estructuras diseñados para soportar cargas mucho mayores que los muros de mampostería tradicionales. Tomado de: http://comoconstruirtuvivienda.blogspot.com/2013_05_01_archive.html

3.1.2. Sistema de pórticos

Se componen de un sistema pilar más vigas que forman uniones monolíticas rigurosas entre ellas, y conforman una estructura. Estos son más resistentes a las cargas que una columna normal con viga. Cuando se conectan elementos horizontales con los verticales se llega a una viga de extremos empotrados que resiste mayores cargas (Villeta, 2000).

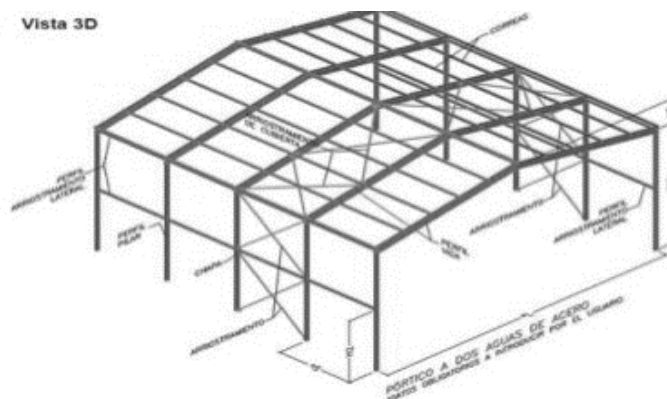


Imagen 2. Esquema de una estructura con un sistema aporticado. Tomado de: <https://www.slideshare.net/marcosherrera1295/sistemas-estructurales-63270004>

Entre los diferentes sistemas constructivos que se podrán encontrar en el medio, la empresa INSTALCOM S.A.S. diseña con los métodos tradicionales que se ejecutan mediante pórticos con diagonales arriostrados concéntricamente (PAC) y excéntricamente (PAE), únicamente en estructuras metálicas, como se muestra en las siguientes figuras:



Imagen 3. Estructura soportada a partir de pórticos arriostrados concéntricamente (PAC). Tomado de:
<https://www.goratools.com/post/diseño-ductil-scbf>

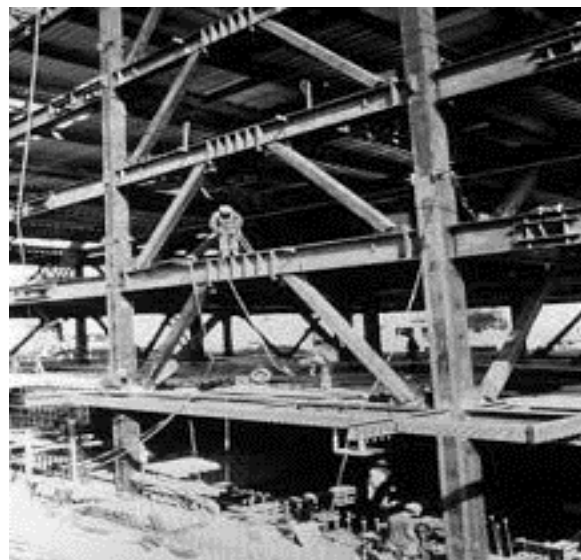


Imagen 4. Estructura soportada a partir de pórticos arriostrados Excéntricamente (PAE). Tomado de:
<http://infobasicingcivil.blogspot.com/2018/07/estructuras-en-acero-y-mixtas-acero.html>

3.1.3. Sistema dual

Consiste en un sistema de pórticos resistentes a momentos (PRM) con muros estructurales o pórticos con diagonales, los cuales pueden actuar en el mismo plano de acción de las cargas. En otras palabras, este sistema combina marcos con muros de corte y elementos diagonales (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2007)

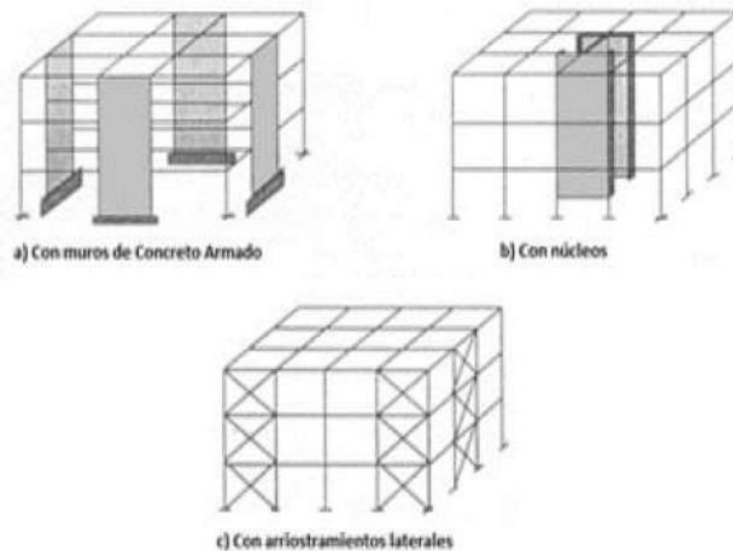


Imagen 5. Esquemas de un sistema estructural dual, Tomado de: <https://www.slideshare.net/archieg/sistemas-estructurales-78843661>

3.1.4. Sistema combinado

Contiene pórticos resistentes a momentos (PRM) y muros estructurales o pórticos con diagonales, pero no actúan en el mismo plano de acción de las cargas. En este las cargas verticales, se soportan desde un pórtico no resistente a momentos, de esta forma las fuerzas horizontales, pueden ser soportadas por unos pórticos con diagonales o desde muros estructurales (Montoya, 2018).



Imagen 6. Construcción basa en un sistema estructural combinado, Tomado de: <https://www.slideshare.net/archieg/sistemas-estructurales-78843661>

Todos los sistemas anteriores están abarcados en la norma sismo resistente colombiana NSR; sin embargo, el diseño de torres de telecomunicaciones no está contemplado en esta normativa y, por tanto, se debe hacer uso de códigos de diseño dónde estén descritos los procedimientos comunes de fabricación y estimación de resistencia, como lo son los manuales de la ANSI (American National Standard Institute) o la ASCE (American Society of Civil Engineers).

3.1.5. Torres de telecomunicaciones

Las torres de comunicación son las encargadas de soportar antenas que transmiten señales en alturas considerables. Ante esto, las empresas prestadoras de servicios de telecomunicaciones están encargadas de plantear la ubicación, localización y definir la altura de estas, con el fin proveer un adecuado servicio a sus clientes.

Para el diseño de torres de telecomunicación los ingenieros estructurales se apoyan en las recomendaciones de la norma americana ANSI/ TIA 222. Con base en lo anterior, el ingeniero estructural tomara la decisión más adecuada para realizar el diseño y así seleccionar el tipo de torre a implementar, para la ANSI las torres más usadas de acuerdo a la necesidad y exigencias de carga a las que se van a someter son: torres atirantadas, torres monopolo y torres autosportadas (Arias y Gonzales, 2019).

3.1.5.1. Torres atirantadas

Estas son torres que disponen de cables a diferentes distancias para generar mayor estabilidad a la estructura. Suelen colocarse sobre estructuras o edificaciones existentes. En su ejecución se debe tener consideraciones especiales ya que la base de la torre soportará un esfuerzo de compresión vertical, y los tirantes generarán o transmitirán esfuerzos a tensión, por tanto, este tipo de torre deberá contar con un sistema de columnas y vigas en la base para

soportar y distribuir todos los esfuerzos que la torre atirantada le va a transmitir (ver imagen 7). Por lo general estas estructuras se arman a partir de perfiles L denominados “ángulos”.



Imagen 7. Torre arriostrada o rendada. Tomado de: <http://selecom.com.gt/wp-content/uploads/2018/01/torresarriostradas.jpg>

3.1.5.2. Torres monopolo

Las torres monopolo son estructuras compuestas de varias secciones tubulares de acero de diferente diámetro y altura. Son utilizadas en áreas urbanas, en donde el espacio es limitado, y proporciona ventajas como su peso ligero, poco requisito de espacio y bajo costo de instalación. Además, este tipo de torres se pueden camuflar con tejido vegetal, lo que resulta más estético visualmente con el ambiente y contexto donde se va a emplazar. Se deberá de construir una cimentación adecuada para resistir los efectos de la carga sobre la torre monopolo (Gutiérrez, 2015).



Imagen 8. Estructura de un monopolo. Tomado de: <https://companycorp.wixsite.com/menicsa/torres-y-monopolos?lightbox=dataItem-igxw3feo>

3.1.5.2.1. Bridas estructurales

Las estructuras tipo monoposte, o monopolo, no cuentan con apoyos laterales que sobrelleven las cargas horizontales, por lo que las conexiones entre los elementos deben ser capaces de soportar esfuerzos a flexión, axial y cortante sin generar problemas de derivas o pandeos, a este tipo de conexiones se les llama bridas. El análisis de la capacidad de sus elementos y conexiones se torna más complejo, debido a la poca bibliografía disponible respecto a los sistemas estructurales tradicionales y sus características únicas de diseño (García, 2012).

Las bridas estructurales son las encargadas de garantizar la estabilidad y seguridad de las torres monopolos y se pueden definir como placas circulares planas en los extremos de los tubos metálicos para acoplar unos a otros con pernos (RAE, 2020). A su vez las bridas suelen estar acompañadas de platinas soldadas entre la brida y el monopolo para ayudar a resistir los desplazamientos laterales de estas torres, a estos elementos se les conoce como rigidizadores o cartelas.

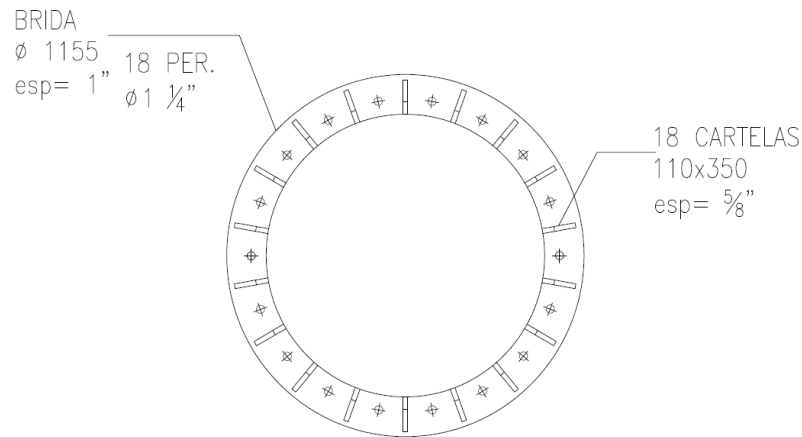


Imagen 9. Vista en planta de una brida. Tomado de: Elaboración propia.

3.1.5.3. Torres autoportadas

Este tipo de torre es menos susceptible a sufrir por torsión, son las más apropiadas para ubicar en zonas urbanas, suburbanas o rurales. Su diseño estructural cumple con la capacidad de soportar varias antenas de gran superficie, su geometría piramidal es la más adecuada en términos de estabilidad, su sección transversal puede ser cuadrada o triangular (Arias y Gonzales, 2019). Por lo general estas estructuras se arman a partir de perfiles L denominados “ángulos”.



Imagen 10. Torres autoportadas cuadradas y triangulares. Tomado de:
https://th.bing.com/th/id/OIP.zOlppQ6wqOB_7ZuauRaFIAHaLH?pid=Api&rs=1

3.2. Tipos de secciones metálicas más comunes

Para construir una estructura metálica se pueden usar diferentes tipologías geométricas para las secciones. Cada una ofrece sus ventajas frente a la adopción de la carga impuesta, apariencia y resistencia en general. En la Imagen 11 se muestran algunas secciones transversales comunes para el uso en estructuras.

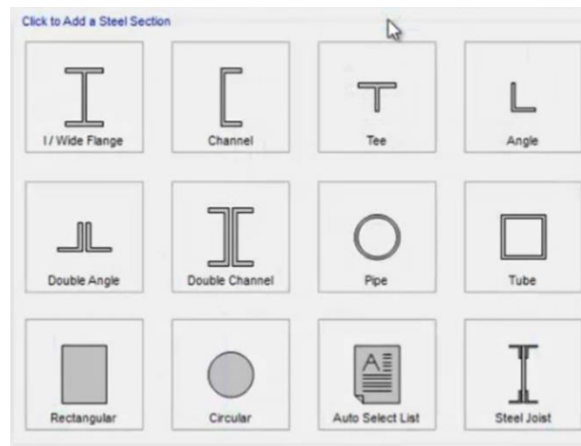


Imagen 11. Secciones comunes en construcción de estructuras metálicas. Tomado de: CSI, software SAP 2000

Los diseñadores de estructuras metálicas aprueban las ventajas que pueden ofrecer las secciones estructurales huecas redondas y rectangulares (en la literatura suelen aparecer las siglas HSS HRS & HCS que abrevian “Hollow Square, Rectangular and Circular Sections”), como la resistencia y rigidez uniformes independientes de la dirección de carga, la alta resistencia a la torsión y el pandeo y la apariencia estética (Willibald, 2003).

A pesar de que los perfiles tubulares pueden sustituirse por perfiles abiertos en estructuras de construcción que a menudo son más resistentes y estables, el perfil tubular puede ahorrar en material, al ser hueco, y permite a los proyectistas un campo más amplio para trabajar la estética, además de la funcionalidad, consiguiendo estructuras resistentes, ligeras y rentables. En general, los perfiles tubulares admiten elementos más esbeltos que los perfiles abiertos para una misma carga de compresión centrada y bajo las mismas condiciones. Estos aspectos han propiciado, en los últimos años, el aumento significativo en el uso de tubulares cerrados como miembros estructurales (Ferrosplanes, 2017). Además de secciones tubulares, los monopolos pueden fabricarse a partir de láminas dobladas, lo cual permite fabricar secciones de mayor espesor y resistencia e incluso fabricar secciones de geometría poligonal (hexagonales, octagonales, etc.).

Al momento de determinar la resistencia de los elementos metálicos (viga, columna, riostra, etc.) se debe tener en cuenta la forma como fueron diseñadas sus conexiones, ya sean Pernadas y/o soldadas, y cuáles son los casos de falla más comunes y desfavorables (según los esfuerzos de flexión, cortante, o tracción requeridos se generan fallas por fluencia, desgarramiento, aplastamiento, bloque de cortante, etc.) (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo

Territorial, 2010). En la imagen 12 se ilustran algunas tipologías de falla para estructuras pernadas.

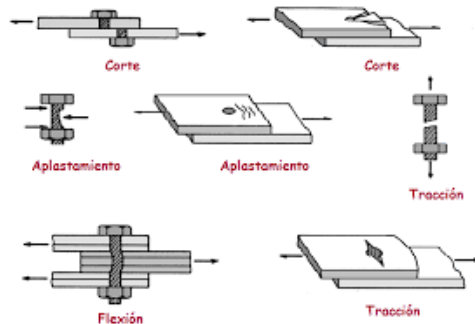


Imagen 12. Tipos de fallas comunes que pueden ocurrir en conexiones pernada, Tomado de: <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/americanab/08-conexionesApernadas/8-4.html>

3.3. Software de apoyo más conocido

A nivel mundial existe una gran cantidad de software que facilita el análisis de la mayoría de los sistemas estructurales, no obstante, cuando se trata de analizar las conexiones entre los elementos que conforman el sistema estructural analizado existen pocos programas que puedan calcular de manera eficiente el tipo de conexión y dimensiones requeridas. Adicionalmente, la gran cantidad de software disponible no incluyen la conexión tipo brida en sus análisis, por tanto, el desarrollo de una hoja de cálculo supone un reto importante y una herramienta útil para cualquier ingeniero estructural.

A continuación, se mencionan algunos programas de diseño estructural más conocidos:

- SAP 2000 (CSI, 2020)
- E-TABS (CSI, 2020)
- MIDAS (MIDAS, 2020)
- TNX-TOWERS (Tower Numerics, 2020)
- RAM CONNECTION (Bentley Communities, 2020)

3.4. Materiales

En Colombia el tipo de acero para los perfiles tubulares es el ASTM A-500 Grado C, para láminas suele ser A-36 o A-572, los perfiles macizos como vigas IPE o HE se consiguen en A-572 (Acesco, 2020). Aunque es común en la práctica observar cómo se fabrican todo tipo de secciones con una correcta soldadura de láminas; vale la pena decir que, según un proyecto o contrato, la solicitud del tipo de acero puede cambiar para cualquier perfil metálico.

4. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, es necesario llevar a cabo las siguientes actividades:

4.1. Capacitación en análisis dinámico y estructuras en acero.

En las tres primeras semanas de este proyecto, en la empresa INSTALCOM S.A.S., se recibió capacitación en análisis dinámico brindada bajo la orientación del Ingeniero Estructural Leonardo Novoa. Esta consistió en los procesos necesarios para hacer un correcto análisis dinámico y análisis de viento de la mayoría de los sistemas estructurales utilizados en la fabricación de estructuras metálicas y con ello determinar las solicitaciones últimas o de servicio que deba soportar la estructura, cumpliendo con los requisitos de estabilidad y resistencia.

4.2. Recopilación de información técnica y normativa vigente requerida para el diseño de estructuras en acero.

La investigación realizada fue de tipo descriptiva basada un rastreo de información cualitativo y cuantitativo en diferentes bases de datos bibliográficas y motores de búsqueda en la red.

El proceso de recopilación de información consistió en la búsqueda de normativas y manuales guía para el diseño de torres monopolo y sus conexiones tubulares pernadas tipo brida. Todo proyecto que se emprenda debe regirse por normas y estándares que con su aplicación lo harán viable, seguro y muy probablemente exitoso. Las normas son documentos escritos, elaborados con la participación de los fabricantes de los productos, materiales y procesos, el gobierno, los usuarios y consumidores, las universidades y asociaciones de profesionales. Dichos documentos son basados en resultados, experiencias y desarrollos tecnológicos, y en muchos casos cuentan con el apoyo de instituciones internacionales dedicadas a la elaboración de especificaciones técnicas y procesos orientados hacia diseños seguros y desarrollos industriales óptimos que a su vez protejan el medio ambiente y la humanidad.

Para el desarrollo de este trabajo se centró especial atención en la Norma sismo resistente colombiana, así como otros códigos de diseño de carácter internacional. Otra búsqueda importante dentro del proceso consistió en obtener información clave para las combinaciones de carga.

4.2.1. Importancia de la NSR-10

Todas las ingenierías, la construcción, el montaje, y su supervisión están regidos por normas que, al aplicarlas, las hacen seguras y confiables. La aplicación de las normas establece procesos limpios y criterios que unifican los diseños haciéndolos verificables, sostenibles y más seguros.

En Colombia, la norma sismo resistente es más rigurosa en aquellas zonas de mayor riesgo y pretenden que las construcciones en general sean seguras y capaces de disipar la energía generada durante altas velocidades del viento o terremoto de magnitudes catastróficas.

4.2.2. Otros códigos de diseño considerados:

A continuación, se mencionan algunos de los códigos de diseño que aportan a la correcta fabricación de torres monopolo:

- ANSI/TIA Standard, ANSI/TIA-222-g
- ASCE, Report 52
- ANSI/ASCE
- ANDREWS, Bulletin 1015F
- ACI 318
- ASTM
- AWS

4.2.3. Cálculo de las cargas para los métodos LRFD y ASD

En esta sección se buscó información aportante a las condiciones de cargas usadas para los métodos Factor de diseño por carga y resistencia LRFD (Load and Resistance Factor Design) y Diseño por esfuerzos admisibles ASD (Allowable Stress Design).

En ambos métodos las cargas individuales se estiman exactamente de la misma manera, sin embargo, debía determinarse información acerca de la selección de la combinación más desfavorable de cargas que pudiera ocurrir al mismo tiempo y que debería usarse para el análisis y el diseño (Mc Cormac, 2013).

4.3. Realización de visitas técnicas a la planta de la empresa para identificar los procesos y diferentes geometrías de las secciones y conexiones disponibles para la construcción.

Se realizaron visitas a la planta de fabricación de la empresa INSTALCOM S.A.S donde se logró identificar los tipos de perfiles que se manejan a nivel comercial, los métodos de corte, perforación, soldadura y preparación de los diferentes perfiles metálicos como lo son:

- Soldadura de filetes y de penetración completa.
- Manejo de la pulidora.
- Ubicación y perforación en los elementos metálicos para pasar los pernos del respectivo diámetro.
- Corte de láminas según las dimensiones especificadas según los planos de fabricación

- Limpieza SSPC para aplicar bases, barreras o acabados anticorrosivos.

4.4. Planteamiento de escenarios de funcionamiento, especificaciones de diseño y/o combinaciones de carga de la estructura.

Para el análisis de diferentes escenarios de funcionamiento y combinaciones de carga fue necesario tener en cuenta las solicitaciones sísmo resistentes según la zona del proyecto, las solicitaciones por cargas eólicas y por cargas axiales en la estructura.

4.4.1. Solicitaciones sísmo resistentes:

La estimación de la resistencia al sismo de la estructura monopolo se hizo basada en la zona de amenaza sísmica, a partir de las consideraciones descritas en los incisos A.3.9 y A.5 de la NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial, 2010). Fue necesaria la consideración de un valor de R_0 para torres monopolo, en vista de que la norma no estipula valores para esta estructura en particular. Para el cálculo de los esfuerzos cortantes se tuvo en cuenta los modos de vibración de la estructura según los lineamientos proporcionados en la sección A.5 de la NSR-10.

4.4.2. Solicitaciones de cargas eólicas:

Con ayuda del Software de diseño E-TABS fue posible atribuir las solicitaciones por cargas de viento ingresando la velocidad regional del viento, los factores de ráfaga y factores geométricos basándose en la norma ASCE 7-10 (ASCE, 2018)

4.4.3. Solicitación de cargas axiales

Las cargas verticales que soporta la estructura se deben al peso propio de los elementos que la conforman, los accesos como la canasta en la parte superior y la escalera y las antenas instaladas.

Vale la pena aclarar que este procedimiento es necesario para la generación de la hoja de cálculo de las conexiones, debido a que las solicitaciones últimas son el dato de entrada más importante para su ejecución.

4.5. Generación de hojas de cálculo del diseño de las conexiones según el diseño global de las estructuras a considerar.

El desarrollo de las hojas de cálculo se elaboró a través de la herramienta Microsoft Excel, en ella se compilaron los cálculos requeridos para realizar el diseño de la conexión bridada.

Para el diseño de una conexión bridada entre secciones tubulares de diferente diámetro es necesario contar con las características mecánicas de los materiales con los cuales se fabrican los tubos, pernos, platinas y rigidizadores, así como datos de geometría de la conexión tales como: resistencia a la fluencia, cortante y tensión, cantidad de pernos y cartelas, diámetro de pernos y platinas.

Una de las consideraciones más importantes en el diseño consiste en que según la disposición de las cargas últimas, se puede diseñar una brida para esfuerzos netamente a tensión, o bien, para esfuerzos a cortante, tensión y flexión combinadas.

4.5.1. Bridas sometidas a tensión pura

Para el cálculo de cargas en las bridas sometidas a tensión se tuvo en cuenta la guía para el cálculo y predimensionamiento de las bridas proporcionada por Instituto Estadounidense de construcciones de acero (Packer, Lecce2010).

En el documento mencionado se indican las ecuaciones involucradas en el cálculo de las solicitaciones de carga según la geometría del elemento y sus propiedades mecánicas.

4.5.2. Bridas sometidas a estados de tensión, cortante y flexión

Para el diseño de estas solicitaciones, se debe hacer un análisis por separado de cada uno de los elementos que componen la brida (pernos, rigidizadores, platina) y asociarlos a sistemas estructurales o situaciones de carga bien conocidas.

4.5.2.1. Resistencia de los pernos

Basándose en el principio de los diagramas de interacción axial contra momento con el que se diseñan las columnas y según los lineamientos del manual de diseño de estructuras de acero (AISC, 2013), se procedió a la revisión de las cargas resultantes para los pernos teniendo en cuenta que debían ser menores que la resistencia a tracción y cortante. También, como parte del diseño de los pernos se verificaron las cargas en un diagrama de interacción de carga a tensión última contra cortante último.

4.5.2.2. Resistencia de los rigidizadores:

Para determinar la resistencia de los rigidizadores se especificó la geometría de la lámina para fabricar el rigidizador, así como la geometría de la platina y el tubo con el fin de calcular el ancho de la cartela. A continuación, se calcula y verifica la carga nominal para el rigidizador a partir de su resistencia y dimensiones.

4.5.2.3. Resistencia de la platina

El cálculo la platina requiere asumir condiciones particulares de apoyo para las cartelas, dependiente de ello será la determinación de momentos y la propuesta de dimensiones acordes con la resistencia.

4.6. Puesta en marcha, verificación y ajustes en el funcionamiento de las herramientas de cálculo.

Se ejecutó la hoja de cálculo diseñada con datos de un ejemplo de diseño con dimensiones conocidas de elementos previos. La validez del cálculo se realizó comparando con el programa TNX Tower (Tower Numerics, 2020) de diseño licenciado, el cual define automáticamente las solicitaciones de viento y calcula las dimensiones de la estructura monopolo y sus conexiones.

Para la verificación del correcto funcionamiento también se validó con los elementos propuestos en la bibliografía para estimar el espesor de la placa. Este fue utilizado debido a que su funcionamiento es muy similar al de las bridas (Mc Cormac y Csernak, 2013).

Finalmente se compararon los resultados entre ambos métodos y se determinó el porcentaje de error.

4.7. Documentación de las memorias de cálculo y recomendaciones para el diseño

Se procedió a plasmar en un documento el procedimiento llevado a cabo en las hojas de cálculo con el fin de que sea reproducible y para el entendimiento de variables involucradas en el análisis. Esta herramienta será útil también como registro de actualizaciones y mejoras en la interfaz o interpretación de las fórmulas llevadas a cabo en ella.

Es importante aclarar que el alcance de este trabajo es determinar las dimensiones y resistencia de las conexiones tipo brida en los monopolos y no análisis estructural en la torre en monopolo.

5. Implementación y análisis de los resultados

Para la implementación de la hoja de cálculo se va a tomar la solicitud de diseño para el monopolo de 18 metros ubicado en la vía Medellín Rionegro, y que fue calculado previamente con el programa TNX Tower. A partir de aquí si mostraran los procedimientos realizados para obtener los datos de entrada de la hoja de cálculo y los resultados arrojados por el software de diseño

5.1. Capacitación en análisis dinámico y estructuras en acero.

Para esta estructura no se consideraron análisis dinámicos y sólo se utilizaron normativas que determinaron la resistencia para cargas de viento sin embargo colocará una breve descripción El procedimiento necesario para aplicar los cortantes basales es decir las reacciones de carga sísmica en el software E-TABS

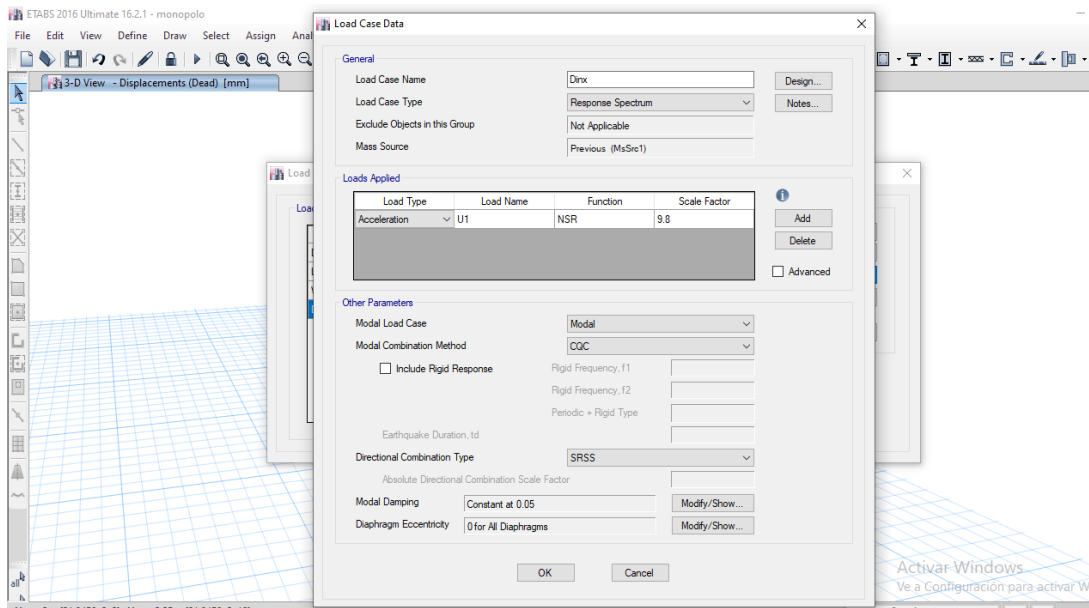


Imagen 13 Asignación de parámetros para realizar el análisis de dinámico de cualquier estructura en el software E-TABS, tomado de: archivo propio

5.2. Recopilación de información técnica y normativa vigente requerida para el diseño de estructuras en acero.

Este proyecto se encaja en uno de los Paradigmas de investigación llamado el Interpretativo, el cual se establece desde lo histórico-hermenéutico; se rescata la historia porque desde su estudio, se adquieren aproximaciones conceptuales (antecedentes de la Empresa INSTALCOM S.A.S y afines a su objeto) a eventos ya ocurridos que posibilitan entender mejor el presente, y la hermenéutica, que el arte de interpretar esos hechos, esas acciones, en esta oportunidad relacionados con el aporte de la *“herramienta de cálculo en Microsoft Excel para apoyar los procesos de modelación y cálculo de conexiones tubulares pernadas en estructuras en acero tipo monopolos de acuerdo con los métodos de diseño utilizados en INSTALCOM S.A.S”*

Se despliega y hay un aprestamiento a recorrer bibliografía e informaciones afines al objeto de estudio. Para lo cual además de analizarán diversos tipos de conexiones tubulares pernadas análogas que permitan una mejor dilucidación de la pregunta problematizante y los objetivos de investigación. (Menéndez, 2019).

5.2.1. Tipo de investigación: Descriptiva

Este tipo de investigación permite medir, recoger y procesar información la cual desde su procesamiento permita la toma de decisiones en prospectiva acorde con Hernández Sampieri y Mendoza (2018), en este caso relacionada con la *Herramienta de cálculo para los procesos de diseño de conexiones tubulares pernadas de estructuras en acero.*

5.2.2. Método: Mixto

Permite combinar las características de los métodos cualitativos con los cuantitativos. En palabras de Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014), la intención del método mixto es (...) utilizar las fortalezas de ambos tipos de indagación, combinándolas y tratando de minimizar sus debilidades potenciales” (p.565).

5.2.3. Importancia de la NSR-10

En Colombia la mayoría de estructuras formales son reglamentadas por la NSR-10, para el diseño de las estructuras metálicas son de primordial interés los títulos A, B y F debido a que en ellos están estipuladas las consideraciones de amenaza sísmica, cargas que deberá soportar la estructura, y las dimensiones y resistencias adecuadas de los elementos metálicos como se muestra en la imagen 21.



Imagen 14 Títulos A, B y F de la norma sismo resistente colombiana (NSR-10) Tomado de: (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo)

5.2.4. Importancia de la ANSI

Para determinar las cargas de viento sobre estructural especiales como Torres monopolo la NSR-10 no contemplan de manera eficiente los factores de su geometría y exposición, por lo tanto, es necesario el uso de normativa internacional en este caso la ANSI/TIA-222-G en dónde se estipulan los factores topográficos, de ráfaga y presión necesarios para calcular de manera eficiente las cargas eólicas.

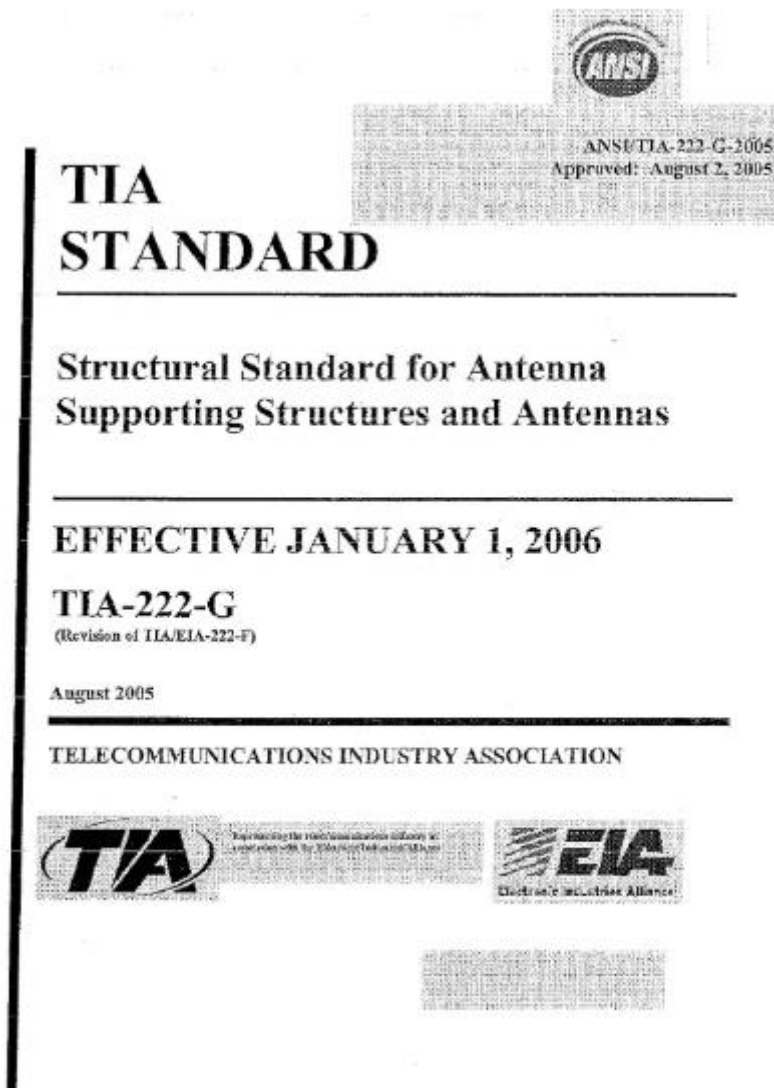


Imagen 15 Norma ANSI/TIA-222-G para análisis de viento en torres monopolo

5.2.5. Combinaciones de carga método LRFD

Con este método se forman grupos posibles de cargas de servicio y cada carga de servicios se multiplica por un factor de carga normalmente mayor de 1.0. La magnitud del factor de la carga refleja la incertidumbre de esa carga específica, la combinación lineal resultante de las cargas de servicio en un grupo cada uno multiplicado por su respectivo factor de carga se llama **carga factorizada** los mayores valores determinados de esta manera se usan para calcular los momentos cortantes y otras fuerzas en las estructuras esos valores de control no deben ser mayores que las resistencias nominales de los miembros multiplicados por sus factores , o de reducción Entonces los factores de seguridad han sido incorporados en los factores de carga y podemos decir

(Factor de reducción Φ) (Resistencia nominal de un miembro R_n) \geq (fuerza factorizada calculada en el miembro R_u)

$$\Phi R_n \geq R_u \quad (\text{Mc Cormac, 2013})$$

5.2.6. Combinaciones de carga Método ASD

Con el método ASD las cargas de servicio generalmente no se multiplican por factores de carga de seguridad. Más bien, se acumulan, tal como estén, para diversas combinaciones factibles, y los mayores valores obtenidos de esta manera se usan para calcular las fuerzas en los miembros. Estas fuerzas totales no deben ser mayores que las resistencias nominales de los miembros divididas por factores de seguridad apropiados, en forma ecuación la expresión puede escribirse cómo:

$$\frac{\text{resistencia nominal del miembro}}{\text{factor de seguridad } \Omega} \geq \text{mayor fuerza calculada en el miembro, } R_a \quad (\text{Mc Cormac, 2013})$$

Para este diseño se tomarán en cuenta las fuerzas resultantes del método **LRFD**.

5.2.6.1. Resistencia de los pernos

Las cargas resultantes que deben soportar los pernos deben ser menores que la resistencia a tracción y cortante y deben ser verificados en un diagrama de interacción de carga a tensión última contra cortante último (ver ecuaciones 5.10, 5.11 y 5.12), basándose en el principio de los diagramas de interacción axial contra momento con el que se diseñan las columnas. Los valores de resistencia al cortante y tensión se encuentran tabulados en el manual de diseño de estructuras metálicas de la Instituto Americano de Construcciones en Acero (AISC 2013) como se muestra en las imágenes 16 y 18, y reproducidas en Excel, como se muestra en las imágenes 17 y 19.

**Table 7-2
Available Tensile
Strength of Bolts, kips**

Nominal Bolt Diameter d_b , in.		$5/8$		$3/4$		$7/8$		1		
Nominal Bolt Area, in. ²		0.307		0.442		0.601		0.785		
ASTM Desig.	F_{nt}/Ω (ksi)	ϕF_{nt} (ksi)	r_n/Ω	ϕr_n	r_n/Ω	ϕr_n	r_n/Ω	ϕr_n	r_n/Ω	ϕr_n
	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 & F1852	45.0	67.5	13.8	20.7	19.9	29.8	27.1	40.6	35.3	53.0
A490	56.5	84.8	17.3	26.0	25.0	37.4	34.0	51.0	44.4	66.6
A307	22.5	33.8	6.90	10.4	9.94	14.9	13.5	20.3	17.7	26.5
Nominal Bolt Diameter d_b , in.		$1\ 1/8$		$1\ 1/4$		$1\ 3/8$		$1\ 1/2$		
Nominal Bolt Area, in. ²		0.994		1.23		1.48		1.77		
ASTM Desig.	F_{nt}/Ω (ksi)	ϕF_{nt} (ksi)	r_n/Ω	ϕr_n	r_n/Ω	ϕr_n	r_n/Ω	ϕr_n	r_n/Ω	ϕr_n
	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 & F1852	45.0	67.5	44.7	67.1	55.2	82.8	66.8	100	79.5	119
A490	56.5	84.8	56.2	84.2	69.3	104	83.9	126	99.8	150
A307	22.5	33.8	22.4	33.5	27.6	41.4	33.4	50.1	39.8	59.6
ASD	LRFD									
$\Omega_v = 2.00$	$\phi_v = 0.75$									

Imagen 16 Resistencia a tensión pernos ASTM Tomado de: AISC Steel Construction Manual 13th pag 7-23.

TAMAÑO DEL TORNILLO	DIÁMETRO (pulg)	Fnt (Ksi)	RESISTENCIA NOMINAL		RESISTENCIA DE DISEÑO		RESISTENCIA DE SERVICIO	
			A325	A490	A325	A490	A325	A490
5/8	0.625	rn(Kips)	27.61	34.67	20.71	26.00	13.81	17.33
3/4	0.750		39.76	49.92	29.82	37.44	19.88	24.96
7/8	0.875		54.12	67.95	40.59	50.96	27.06	33.97
1	1.000		70.69	88.75	53.01	66.56	35.34	44.37
1 1/8	1.125		89.46	112.32	67.10	84.24	44.73	56.16
1 1/4	1.250		110.45	138.67	82.83	104.00	55.22	69.34
1 3/8	1.375		133.64	167.79	100.23	125.84	66.82	83.90
1 1/2	1.500		159.04	199.69	119.28	149.77	79.52	99.84

Imagen 17 Reproducción de la resistencia a tensión pernos ASTM Tomado de: propia.

**Table 7-1
Available Shear
Strength of Bolts, kips**

Nominal Bolt Diameter d_b , in.					$5/8$		$3/4$		$7/8$		1	
Nominal Bolt Area, in. ²					0.307		0.442		0.601		0.785	
ASTM Desig.	Thread Cond.	F_{nv}/Ω (ksi)	ϕF_{nv} (ksi)	Loading	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$
		ASD	LRFD		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 F1852	N	24.0	36.0	S D	7.36	11.0	10.6	15.9	14.4	21.6	18.8	28.3
					14.7	22.1	21.2	31.8	28.9	43.3	37.7	56.5
	X	30.0	45.0	S D	9.20	13.8	13.3	19.9	18.0	27.1	23.6	35.3
					18.4	27.6	26.5	39.8	36.1	54.1	47.1	70.7
A490	N	30.0	45.0	S D	9.20	13.8	13.3	19.9	18.0	27.1	23.6	35.3
					18.4	27.6	26.5	39.8	36.1	54.1	47.1	70.7
	X	37.5	56.3	S D	11.5	17.3	16.6	24.9	22.5	33.8	29.5	44.2
					23.0	34.5	33.1	49.7	45.1	67.6	58.9	88.4
A307	-	12.0	18.0	S D	3.68	5.52	5.30	7.95	7.22	10.8	9.42	14.1
					7.36	11.0	10.6	15.9	14.4	21.6	18.8	28.3

Nominal Bolt Diameter d_b , in.					$1\ 1/8$		$1\ 1/4$		$1\ 3/8$		$1\ 1/2$	
Nominal Bolt Area, in. ²					0.994		1.23		1.48		1.77	
ASTM Desig.	Thread Cond.	F_{nv}/Ω (ksi)	ϕF_{nv} (ksi)	Loading	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$	r_n/Ω_v	$\phi_v r_n$
		ASD	LRFD		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 F1852	N	24.0	36.0	S D	23.9	35.8	29.5	44.2	35.6	53.5	42.4	63.6
					47.7	71.6	58.9	88.4	71.3	107	84.8	127
	X	30.0	45.0	S D	29.8	44.7	36.8	55.2	44.5	66.8	53.0	79.5
					59.6	89.5	73.6	110	89.1	134	106	159
A490	N	30.0	45.0	S D	29.8	44.7	36.8	55.2	44.5	66.8	53.0	79.5
					59.6	89.5	73.6	110	89.1	134	106	159
	X	37.5	56.3	S D	37.3	55.9	46.0	69.0	55.7	83.5	66.3	99.4
					74.6	112	92.0	138	111	167	133	199
A307	-	12.0	18.0	S D	11.9	17.9	14.7	22.1	17.8	26.7	21.2	31.8
					23.9	35.8	29.5	44.2	35.6	53.5	42.4	63.6

ASD **LRFD**
 $\Omega_v = 2.00$ $\phi_v = 0.75$

Imagen 18 Resistencia a cortante pernos ASTM (Tomado de: AISC Steel Construction Manual 13th pag 7-22).

								ϕ 0.75				Ω 2	
TAMAÑO DEL TORNILLO	DIÁMETRO (pulg)	RESISTENCIA NOMINAL				RESISTENCIA DE DISEÑO				RESISTENCIA DE SERVICIO			
		A325-N	A325-X	A490-N	A490-X	A325-N	A325-X	A490-N	A490-X	A325-N	A325-X	A490-N	A490-X
		F_{nv} (Ksi)											
		48	60	60	75	48	60	60	75	48	60	60	75
5	0.625	14.73	18.41	18.41	23.01	11.04	13.81	13.81	17.26	7.36	9.20	9.20	11.50
6.00	0.750	21.21	26.51	26.51	33.13	15.90	19.88	19.88	24.85	10.60	13.25	13.25	16.57
7.00	0.875	28.86	36.08	36.08	45.10	21.65	27.06	27.06	33.82	14.43	18.04	18.04	22.55
8.00	1.000	37.70	47.12	47.12	58.90	28.27	35.34	35.34	44.18	18.85	23.56	23.56	29.45
9.00	1.125	47.71	59.64	59.64	74.55	35.78	44.73	44.73	55.91	23.86	29.82	29.82	37.28
10.00	1.250	58.90	73.63	73.63	92.04	44.18	55.22	55.22	69.03	29.45	36.82	36.82	46.02
12.00	1.375	71.27	89.09	89.09	111.37	53.46	66.82	66.82	83.53	35.64	44.55	44.55	55.68
16.00	1.500	84.82	106.03	106.03	132.54	63.62	79.52	79.52	99.40	42.41	53.01	53.01	66.27

Imagen 19 Reproducción de la resistencia a cortante pernos ASTM, Tomado de: propia

5.3. Realización de visitas técnicas a la planta de la empresa para identificar los procesos y diferentes geometrías de las secciones y conexiones disponibles para la construcción.

5.3.1. Evidencias fotográficas

A continuación, se muestran algunos de los perfiles más comunes para fabricación de estructuras metálicas en la empresa INSTALCOM S.A.S. algunos productos preparados y listos para su instalación en sitio:



Imagen 20 Elementos estructurales de monopolos listos para instalación fabricados en la empresa INSTLACOM S.A.S



Imagen 21 Perfiles metálicos usados en la empresa INSTALCOM S.A.S para la instalación de estructuras metálicas asignadas a la empresa.

5.4. Planteamiento de escenarios de funcionamiento, especificaciones de diseño y/o combinaciones de carga de la estructura.

5.4.1. Solicitaciones sísmo resistentes:

La estimación de la resistencia al sismo de la estructura monopolo se hizo basado en la zona de amenaza sísmica, el método de análisis dinámico y la asignación de un coeficiente de disipación de energía moderado (R_0) para tener un diseño conservativo, estas consideraciones están descritas en los incisos A.3.9 y A.5 de la NSR-10.

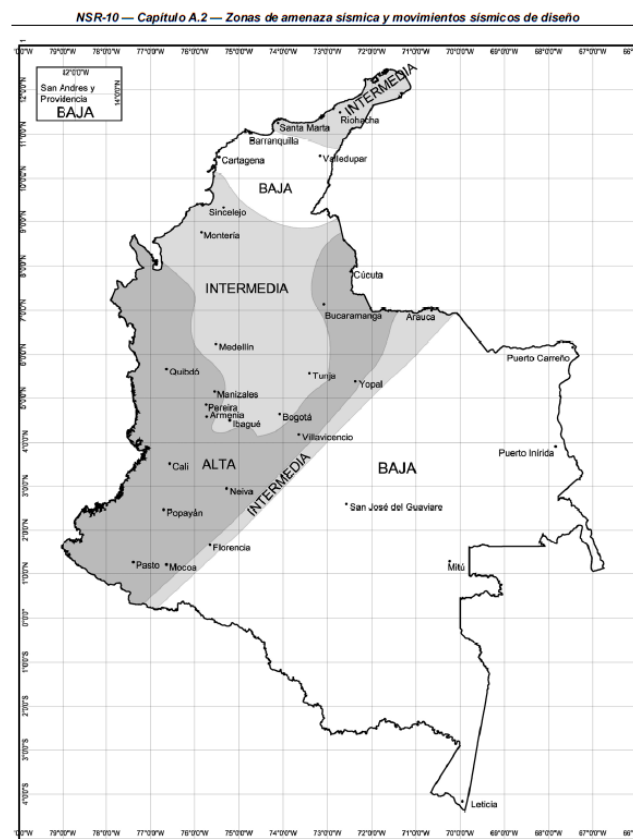


Figura A.2.3-1 — Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de A_s y A_v

Imagen 22. Zonas de amenaza sísmica en el territorio colombiano. Tomado de: NSR-10, Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sísmo resistente.

Aunque la norma no estipula valores de R_0 para estructuras como torres monopolo, de manera conservadora se propone un valor entre 3 y 4, este valor reduce la carga sísmica entre el valor de R_0 asignado

El valor de los cortantes se calcula con los modos de vibración que cubran el mayor porcentaje de masa y garantizando que lleguen a ser el 90% de los cortantes teóricos calculados, este

procedimiento es bastante riguroso y extenso, sin embargo, este procedimiento se encuentra detallado en la sección A.5 de la NSR-10.

5.4.2. Solicitaciones de cargas eólicas:

Con ayuda del Software de diseño E-tabs es posible atribuir las solicitaciones por cargas de viento ingresando la velocidad regional del viento basándose en la norma ASCE 7-10.

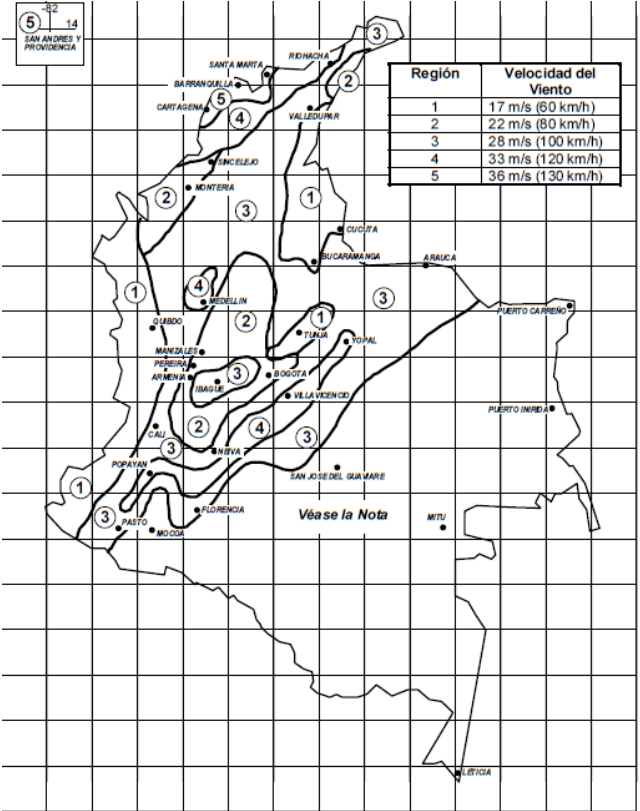


Imagen 23. Zonas de velocidad del viento en el territorio colombiano (sujeto a modificaciones de decretos posteriores al año de publicación de esta norma). Tomado de: NSR-10, Título B: Cargas.

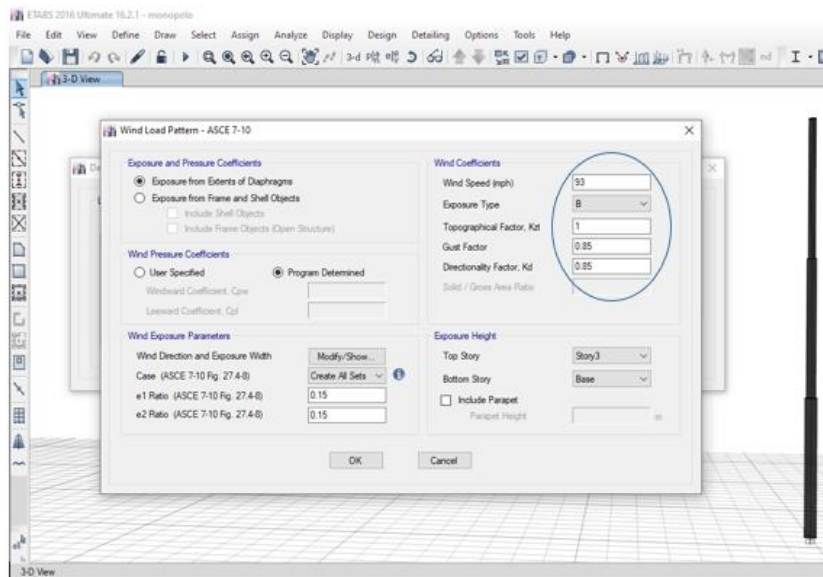


Imagen 24 Asignación de parámetros para el cálculo de las fuerzas eólicas teóricas basados en la norma ASCE 7-10 que soportará el monopolo, tomado de: archivo propio

5.4.3. Solicitación de cargas axiales

Las cargas verticales que soporta la estructura se deben al peso propio de los elementos que conforman la estructura, los accesos como la canasta en la parte superior y la escalera y las antenas instaladas.

Vale la pena aclarar que este procedimiento es necesario para la generación de la hoja de cálculo de las conexiones, debido a que las solicitudes últimas son el dato de entrada más importante para su ejecución.

Cómo se mencionó anteriormente, no se tendrá en cuenta el análisis dinámico para este monopolo sí no que se tomaran las cargas de viento que llegan la estructura según la ubicación, en este caso en la vía Medellín- Rionegro. Para este monopolo la velocidad regional del viento es de 150 km por hora.

La silueta de diseño en muestra en la siguiente figura.

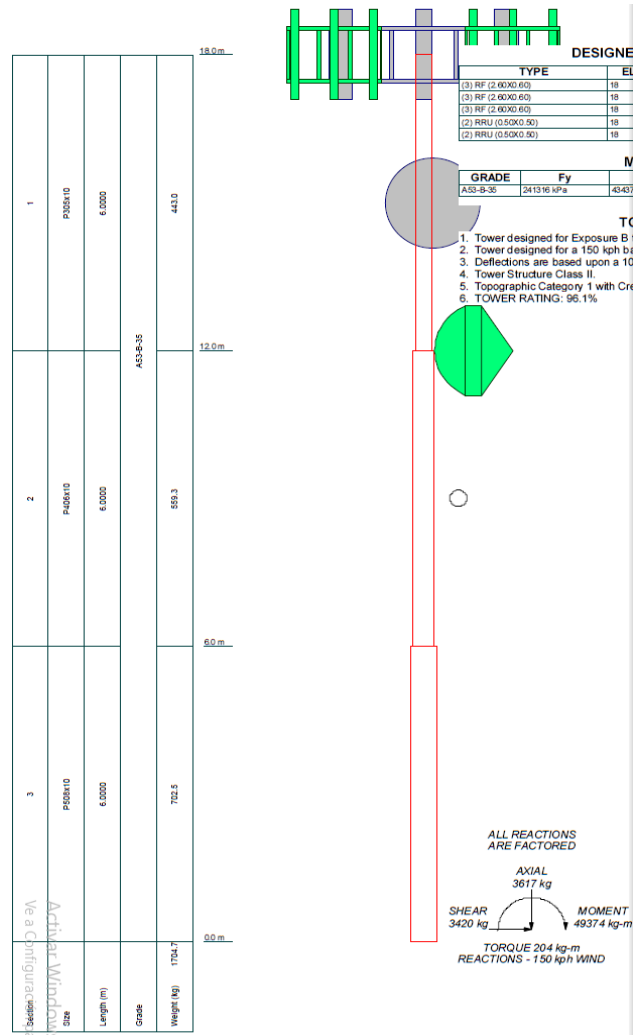


Imagen 25 Silueta de diseño, monopolo padre marianito, vía Medellín-Rionegro, Tomado de: base de datos de INSTALCOM.S.A.S

Datos de entrada

5.4.4. Perfiles utilizados

- Tubo estructural de diámetro exterior 508mm y 6m de altura
- Tubo estructural de diámetro exterior 408mm y 6m de altura
- Tubo estructural de diámetro exterior 308mm y 6m de altura

5.4.5. Materiales

- Los materiales para los tubos, platinas y rigidizadores son A53 Gr B, con resistencia a la fluencia, $F_y = 250\text{MPa}$.

- Los pernos son ASTM A325, las resistencias a cortante y tensión están tabuladas y descritas en la sección 5.5.2.1.

5.4.6. Solicitaciones

En este caso utilizaremos las cargas dispuestas en la memoria de cálculo del software TNX TOWER para realizar el comparativo entre la conexión propuesta por el programa y la conexión que se propone con la hoja de cálculo para la brida que se ubicará entre el primer y segundo tubo, las cargas últimas son:

- Cortante: 15.1 kN
- Momento: 154.9 kN-m
- Tensión en el tubo: 27.45 kN

Como se puede observar, las solicitaciones requieren un diseño de conexiones a flexo compresión y cortante, dejando a un lado las ecuaciones para el caso de tensión pura.

5.5. Generación de hojas de cálculo del diseño de las conexiones según el diseño global de las estructuras a considerar.

5.5.1. Bridas sometidas a tensión pura

Para este caso de cargas, el Instituto Estadounidense de construcciones de acero (Packer, Lecce2010) ofrece una guía para el cálculo de la resistencia y predimensionamiento de las bridas, las ecuaciones para su desarrollo se describen a continuación:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{2P_r}{cF_{yp}\pi f_3}} \quad (5.1)$$

$$n \geq \frac{P_r}{R_c} \left[1 - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_3 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \right] \quad (\text{Ln} = \text{logaritmo natural}) \quad (5.2)$$

$$W \geq \frac{P_r \sqrt{2}}{F_{wc}\pi D} \quad (5.3)$$

Dónde:

D = Diámetro exterior del perfil tubular en, pulgadas

F_{yp} = Resistencia a la fluencia de la platina, ksi

P_r = Solicitación de carga usando las combinaciones de carga LRFD o ASD

R_c = Resistencia a cortante de los pernos, kips

$$f_3 = \frac{1}{2k_1} \left(k_3 + \sqrt{k_3^2 - 4k_1} \right) \quad (5.4)$$

$$k_1 = \ln \left(\frac{r_2}{r_3} \right) \quad (5.5)$$

$$k_3 = k_1 + 2 \quad (5.6)$$

$$r_1 = \frac{D}{2} + 2b \quad (5.7)$$

$$r_2 = \frac{D}{2} + b \quad (5.8)$$

$$r_3 = \frac{D-t}{2} \quad (5.9)$$

t = Espesor del perfil tubular, pulgadas

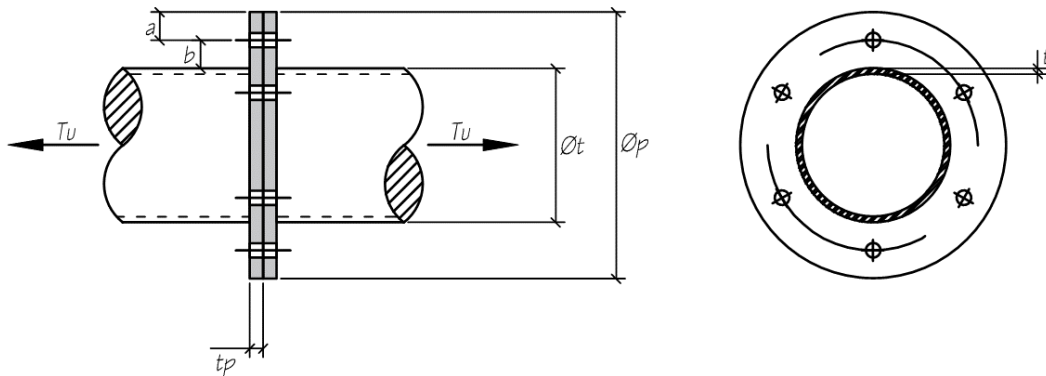


Imagen 26 Conexión bridas sometida a tensión pura, Tomado de: propia

5.5.2. Bridas sometidas a estados de tensión, cortante y flexión

Para el diseño de estas solicitaciones, se debe hacer un análisis por separado de cada uno de los elementos que componen la brida y asociarlos a sistemas estructurales o situaciones de carga bien conocidas.

5.5.2.1. Resistencia de los rigidizadores:

Para determinar la resistencia de los rigidizadores se realiza la siguiente secuencia o algoritmo:

- Se ingresa el espesor de la lámina con la que se fabricará el rigidizador.
- Con los diámetros de la platina y el tubo podemos calcular el ancho de la cartela.
- Conociendo la resistencia a fluencia del material determinamos la carga nominal que resiste multiplicando el esfuerzo de fluencia límite por el área generada por el espesor y el ancho del rigidizador.
- Se comparan los valores de resistencia obtenidos con la resultante de la reacción en los pernos y se aproxima su porcentaje de uso teórico. Se debe verificar que sea inferior al 100%

5.5.2.2. Resistencia de la platina

Para el caso de la platina lo más complicada es determinar el espesor necesario para que soporte los esfuerzos sin ser sobre diseñado o sobre estimado, para lograr esto se debe:

- Asumir que las cartelas son apoyos empotrados y entre ellas se encuentra una fuerza puntual, que será la resistencia última del perno, esto es, una viga doblemente empotrada con una carga puntual en la mitad de su luz.
- Calcular el momento de empotramiento generado por la carga resultante de acuerdo a la ecuación (5.16)
- Proponer un espesor y calcular el módulo de sección y el módulo plástico
- Hallar los valores del momento nominal eligiendo al menor entre el momento plástico y el momento de fluencia, como se muestra en las ecuaciones (5.17) y (5.18)
- Determinar el porcentaje de uso entre el momento de empotramiento calculado y el momento nominal
- Verificar que el porcentaje de uso sea inferior al 100%

5.5.2.3. Ecuaciones

A continuación, se describen las ecuaciones para el cálculo de la resistencia de conexiones bridadas a flexo compresión y cortante combinados:

$$f_i = \frac{P_r}{nA_p} \pm \frac{M_{ux}\bar{x}_i}{I_{xi}} \pm \frac{M_{uy}\bar{y}_i}{I_{yi}} \quad (5.10)$$

f_i = Esfuerzos generados por cargas axiales y momentos en direcciones x y y

P_r = Solicitación de carga axial usando las combinaciones de carga LRFD

n = Número de pernos que contiene la brida

M_{ux} = Momentos resultantes del análisis estructural en los nodos ubicados en las conexiones en la dirección “x”

M_{uy} = Momentos resultantes del análisis estructural en los nodos ubicados en las conexiones en la dirección “y”

\bar{x}_i = Distancia en la dirección “x” desde el centro geométrico de la conexión hasta el perno a analizar

\bar{y}_i = Distancia en la dirección “y” desde el centro geométrico de la conexión hasta el perno a analizar

I_{xi} = Inercia del perno i en la dirección “x”

I_{yi} = Inercia del perno i en la dirección “y”

$$T_u = f_{max}A_p \quad (5.11)$$

T_u = Carga a tensión última que soportarán los pernos

A_p = Área del perno

f_{max} = Valor del perno con mayor concentración de esfuerzos

$$\left(\frac{V_u}{\phi V_n} ; \frac{T_u}{\phi T_n} \right) \quad (5.12)$$

V_u = Carga a cortante última de los pernos

M_u = momento último que soportará la brida

T_n = Resistencia a tensión nominal de los pernos

V_n = Resistencia a cortante nominal de los pernos

ϕ = Factor de reducción de resistencia según el método de diseño LRFD

$$\theta_i = \frac{360^\circ}{n} i \quad (5.13)$$

θ = Ángulo cubierto entre 2 pernos consecutivos.

n = Número de pernos que contiene la brida.

$$I_x = \sum A_p (d * \cos\theta_i)^2 \quad (5.14)$$

$$I_y = \sum A_p (d * \sen\theta_i)^2 \quad (5.15)$$

θ = Ángulo cubierto entre 2 pernos consecutivos.

d = Diámetro de circulo de la línea de pernos, suele estar ubicado a 1.5 veces el diámetro de perno de distancia a la cara exterior del tubo

A_p = Área del perno

$$M_{emp} = \frac{PuL}{8} \quad (5.16)$$

M_{emp} = Momento en la reacción de una viga doblemente empotrada y en estado de empotramiento perfecto

P_u = Carga última que resistirá el rigidizador

L = Longitud de arco entre 2 rigidizadores consecutivos

$$\phi M_p = \phi f_y Z \quad (5.17)$$

M_p= Momento plástico de la platina

Z = Módulo de plástico de la sección transversal de la suposición de una viga doblemente empotrada

f_y = Esfuerzo de fluencia del material

ϕ = Factor de reducción de resistencia según el método de diseño LRFD

$$\phi M_y = \phi f_y S \quad (5.18)$$

M_y = Momento de fluencia de la platina

S= Módulo de sección de la sección transversal de la suposición de una viga doblemente empotrada

f_y = Esfuerzo de fluencia del material

ϕ = Factor de reducción de resistencia según el método de diseño LRFD

$$S = \frac{I}{c} \quad (5.19)$$

I = Inercia de la sección transversal de la suposición de una viga doblemente empotrada

c = Centro geométrico de la sección transversal de la suposición de una viga doblemente empotrada

$$\frac{V_u}{\phi V_n} < 1, \frac{T_u}{\phi T_n} < 1, \frac{M_u}{\phi M_n} < 1 \quad (5.20)$$

$$\phi M_n = \min (\phi M_p; \phi M_y)$$

M_n = Resistencia al momento nominal de la brida

$$\bar{x}_i = d \cos \theta \quad (5.21)$$

$$\bar{y}_i = d \sin \theta \quad (5.22)$$

$$L = \frac{\pi d}{n} \quad (5.23)$$

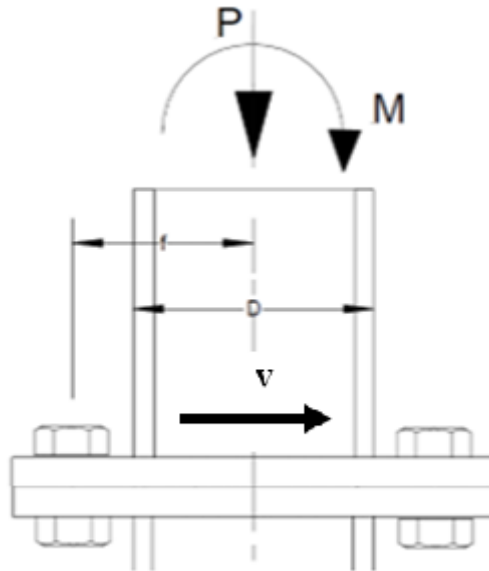


Imagen 27 Conexión bridadas sometida a cortantes, axial y momentos, Tomado de: propia

Como la estructura es simétrica, podemos realizar el diseño para las fuerzas actuantes en una dirección de cargas. Para brida entre los tubos de 508mm y 408mm de diámetro Empezaremos con 20 pernos de 5/8 de pulgada:

5.5.2.4. Resistencia de los pernos

$n = 20$, $A_p = 198 \text{ mm}^2$, $\theta = 18^\circ$, $d = 584.2 \text{ mm}$, $\overline{x_{max}} = 0.584 \text{ m}$, $P_r = 27.45 \text{ kN}$,
 $V_u = 15.10 \text{ kN}$, $M_{ux} = 154.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $I_x = 0.000675523 \text{ m}^4$, $f_{max} = 140.98 \text{ MPa}$, $T_u = 27.9 \text{ kN}$,
 $\phi V_n = 31.70 \text{ kN}$, $\phi T_n = 59.43 \text{ kN}$, $\left(\frac{V_u}{\phi V_n}; \frac{T_u}{\phi T_n}\right) = (0.48; 0.47)$

PERNOS				1.00	2.00
#pernos =	20.00		X COOR (m)	0.58	0.56
ϕ perno =	15.88	mm	Y COOR (m)	0.00	0.18
A perno=	197.93	mm ²			
ϕV_n =	31.70	kN	f (MPa)	140.98	134.42
ϕT_n =	59.43	kN	Tu=	27.90	kN
ϕ LÍNEA DE PERNOS=	584.200	mm	Ix =Iy	0.000675523	m ⁴
$V_u/\phi V_n$ =	0.48				
$T_u/\phi T_n$ =	0.47				
θ =	18.00				

Imagen 28 Cálculo de la resistencia de los pernos en la hoja de Excel propuesta Tomado de: archivo propio

5.5.2.5. Resistencia de los rigidizadores

Se proponen rigidizadores de 9mm de espesor, 12cm de altura y 6.35cm de ancho

$t = 9 \text{ mm}$, $b = 63.5$, $h = 120 \text{ mm}$ $\phi P_n = 87.10 \text{ kN}$, $P_u = \max(\phi T_n; \phi V_n) = 59.43 \text{ kN}$

Dónde:

t = espesor del rigidizador

b = ancho del rigidizador

h = altura del rigidizador

RIGIDIZADOR		
Es =	200000.00	MPa
Fy =	240.00	MPa
Pu=	59.43	kN
h=	120.00	mm
Ancho=	63.5	mm
t=	6.35	mm
ϕP_n =	87.10	kN

Imagen 29.Cálculo de la resistencia de los rigidizadores en la hoja de Excel propuesta. Tomado de: archivo propio

5.5.2.6. Resistencia de la brida

Con la carga última que llega al rigidizador, calcularemos el momento de empotramiento y el esfuerzo y espesor de la platina. Para el diseño de estas conexiones se recomienda que los diámetros exterior e interior de la brida estén separados del centro de los pernos por lo menos 2 veces el diámetro de los pernos.

Con estas recomendaciones se puede obtener las dimensiones y resistencia de la brida:

$$D_{ext} = 635\text{mm}, D_{int} = 508\text{mm}, L = 0.092\text{m}, M_{emp} = M_u = 0.682 \text{ kN-m}, V_u = 29.71 \text{ kN},$$

$$t = 19.05\text{mm}, Z = 5761.08 \text{ mm}^3, I = 36582.84 \text{ mm}^4, S = 3840.72\text{mm}^3, \phi M_p = 1.3 \text{ kN-m},$$

$$\phi M_y = 0.86 \text{ kN-m}, \phi M_n = \max(\phi M_y; \phi M_n) = 0.86 \text{ kN-m}, \phi V_n = 163.31 \text{ kN}.$$

PLATINA			MOMENTOS DE EMPOTRAMIENTO			CAPACIDAD		
Es =	200000.00	MPa	L=	0.092	m	$\phi M_p =$	1.30	kN*m
Fy =	250.00	MPa	Memp, Mu	0.682	kN*m	$\phi M_y =$	0.86	kN*m
Fu =	450.00	MPa	Vu=	29.71	kN	$\phi M_n =$	0.86	kN*m
ϕ EXT =	635.00	mm	t=	19.05	mm	$\phi V_n =$	163.31	kN
ϕ INT =	508.00	mm	Z=	5761.08	mm ³	% Uso	79%	cumple
			I=	36582.84	mm ⁴			
			S=	3840.72	mm ³			

Imagen 30 Cálculo de la resistencia de la brida en la hoja de Excel propuesta Tomado de: archivo propio

5.6. Puesta en marcha, verificación y ajustes en el funcionamiento de las herramientas de cálculo.

A continuación, se mostrarán los resultados arrojados por el programa TNX Tower y la hoja de cálculo propuesta para el diseño de las bridas.

BRIDA 1

Variable	Description	Value	Unit
<i>Flange Dimensions</i>			
Di	Flange Inside Diameter	508.000	mm
Do	Flange Outside Diameter	608.000	mm
Dbc	Flange Bolt Circle Diameter	558.000	mm
tp	Thickness of Pipe	9.530	mm
t	Thickness of Flange	19	mm
tw	Fillet Weld Size	6	mm
<i>Bolting Information</i>			
N	Number of Bolts (Must be multiple of 4)	20	
d	Nominal Bolt Diameter	19.050	mm
Fp	Pre-Load on Bolt as % of Allowable Bolt Tension	75%	
T	Torque to produce bolt pretension	210	N-m
The preloading is adequate to ensure the joint is in compression. (>71.0%)			
<i>Loads</i>			
M	Moment on Flange	154,925	N-m
Mt	Torque on Pipe	-	N-m
V	Vertical Load (+ is Tensile)	(27,455)	N
S	Shear Load on Flange	15,101	N
<i>Gusset Information</i>			
hg	Height of Gussets	155	mm
tg	Thickness of Gussets	16	mm
Sg	Width of Flats on Gusset Corners	150.00	mm
<i>Material Properties</i>			
Fyb	Allowable Flange Yield Stress	240	N/mm ²
Fbg	Allowable Gusset Yield Stress	240	N/mm ²
E	Modulus of Elasticity for Flange	200,000	N/mm ²
Eb	Modulus of Elasticity for Bolt	200,000	N/mm ²
Fyp	Yield Stress of Pipe	250	N/mm ²
Ft	Allowable Bolt Tension Stress	304	N/mm ²
Fv	Allowable Bolt Shear Stress	317	N/mm ²
Fw	Tensile Stress of Weld	483	N/mm ²
		Electrode:	E70xx

Imagen 31 Datos de entrada para el cálculo de conexiones monopolo en el programa TNX TOWER, Tomado de: Base de datos de INSTLACOM S.A.S.

Es común que el número de perno se un número par sin embargo según las especificaciones ese número puede variar No obstante en el programa de diseño te en x software Tower esta cantidad obligatoriamente debe ser múltiplo de 4.

Aunque el funcionamiento y diseño de placas base es similar al de las conexiones tipo brida no es recomendable utilizar los métodos que se usan para dimensionar la placa base en los diseños de la brida, uno de los principales factores es que estas son de sección hueca mientras que la placa es completa, y esta también es una de las razones por las cuales se utilizan rigidizadores a los largo de la platina.

Summary of Conditions Checked	Unity Ratio	Result
Bolt Tension (Actual Tension/Allowable Tension)	0.78	OK
Bolt Shear (Actual Shear/Allowable Shear)	0.01	OK
Flange Stress (Required Thickness/Actual Thickness)	0.83	OK
Gusset Stress (Required Thk/Actual Thk)	0.97	OK
Local Shell Stress (Required Thk/Actual Thk)	0.64	OK
Weld Stress (Actual Fillet Size/Required Fillet Size)	0.64	OK

Calculate Bolt Loading			
<i>(Ref. "Mechanical Engineering Design" 4th ed., Shigley & Mitchell)</i>			
Ab	Nominal Bolt Area	Nominal Area of Bolt	285.02 mm ²
P	Bolt Load due to V and M	$4 \cdot M / (N \cdot D_i) + V / N$	59.621 N
km	Stiffness of Material	$PI \cdot E \cdot d / (2 \cdot LN(5 \cdot (2 \cdot t + 0.5 \cdot d) / (2 \cdot t + 2.5 \cdot d)))$	5,863.268 N/mm ²
kb	Stiffness of Bolt	$PI \cdot d^2 \cdot E_b / (4 \cdot (2 \cdot t))$	1,500.121 N/mm ²
CC	Ratio of Bolt Stiffness to Total Stiffness	$K_b / (K_b + K_m)$	0.204
Fi	Bolt Initial Load (PreLoad)	$F_i = 0.85 \cdot F_p \cdot A_b$	55,181 N
Fmin	Min Force to keep flg in compression	$1.1 \cdot P \cdot (1 - CC)$	52,222 N
Fb	Actual Tensile Load on Bolt	$K_b \cdot P / (K_b + K_m) + F_i$	67,328 N
Fballow	Allowable Bolt Tensile Load - Pure Tension	$F_t \cdot A_b$	86,559 N
Fbcomb	Allowable Bolt Tensile Load - Tens & Shear	$((54 \cdot 2 \cdot 3.75 \cdot (S / A_b)^2)^{0.5}) \cdot A_b$	106,151 N
The tensile bolt load is acceptable			
S	Shear on Bolt	$S / N + 2 \cdot M / (D_{bc} \cdot N)$	755 N
Sallow	Allowable Shear on Bolt	$F_v \cdot A_b$	90,352 N
The shear bolt load is acceptable			

Imagen 32 Chequeo de capacidades de brida y los pernos por el programa TNX Tower, Tomado de: Base de datos INSTALCOM.S.A.S

Design Flange (with Gussets)			
<i>Bolt Tension (Conservatively assume a fixed beam with a point load in center)</i>			
Mreq'd	Moment on Flange	$P \cdot PI \cdot D_{bc} / N \cdot A_b$	653 N m
treq'd	Required Flange Thickness	$((6 \cdot M_{max}) / ((D_o - D_i) \cdot F_b \cdot 0.66))^{0.5}$	15.730 mm
Flange thickness is acceptable			

Check Gusset		
x	w(x)	t _g
mm	mm	mm
0.00	150.00	15.056
0.50	140.00	15.085
1.00	130.00	15.077
1.50	120.00	15.094
2.00	110.00	15.115
2.50	100.00	15.147
3.00	90.00	15.191
3.50	80.00	15.255
4.00	70.00	15.353
4.50	60.00	15.511
5.00	50.00	15.734
155.00	50.00	37.540
		t _g = 15.511

Notes:
 $t_g = 6 \cdot P \cdot ((D_{bc} - D_o) / 2)^2 \cdot w(x) / (w(x) \cdot 2 \cdot F_b \cdot 0.66 \cdot h_g) + P / ((D_{bc} - D_o) / 2) \cdot 0.66 \cdot F_b \cdot h_g$
 Result ==> Gusset Thickness is Adequate
 Shell Thickness req'd for local shell stress:
 $t_{req'd} = ((1.5 \cdot P_{bolt} \cdot (D_o - D_s) / 2) / (PI \cdot F_b \cdot h_g))^{0.5} = 6.061$ in
 Result ==> Shell Thickness is Adequate

BRIDA LAM A36 DE 608mm (MINIMO) DE DIÁMETRO CON ESPESOR DE 19mm – 20 TORNILLOS A325 T1 3/4" Y ATIESADORES EN 16mm h=175mm.

Imagen 33 Chequeo de capacidades de los rigidizadores y diseño propuesto de la conexión por el programa TNX Tower, Tomado de: Base de datos INSTALCOM.S.A.S

Con este mismo procedimiento podemos diseñar cualquier tipo de brida siempre y cuando tengamos las solicitaciones, sin embargo, a manera de ejemplo sólo se ha descrito el procedimiento para la primera brida de este monopolo

SOLICITACIONES		
Vu=	15.10	kN
Mu =	155.00	kN.m
AXIAL=	27.46	kN
TUBO		Ø406x 12.7
t	10.00	mm
Ø EXT =	508.00	mm
Ø INT =	488.00	mm
PERNOS		
#pernos =	20.00	
Øperno =	15.88	mm
A perno=	197.93	mm ²
ØVn=	31.70	kN
ØTn=	59.43	kN
ØLINEA DE PERNOS=	584.200	mm
Vu/ØVn=	0.48	
Tu/ØTn=	0.47	
θ =	18.00	

Imagen 34 Datos de entrada, y estimación de la resistencia de los pernos Tomado de: archivo propio

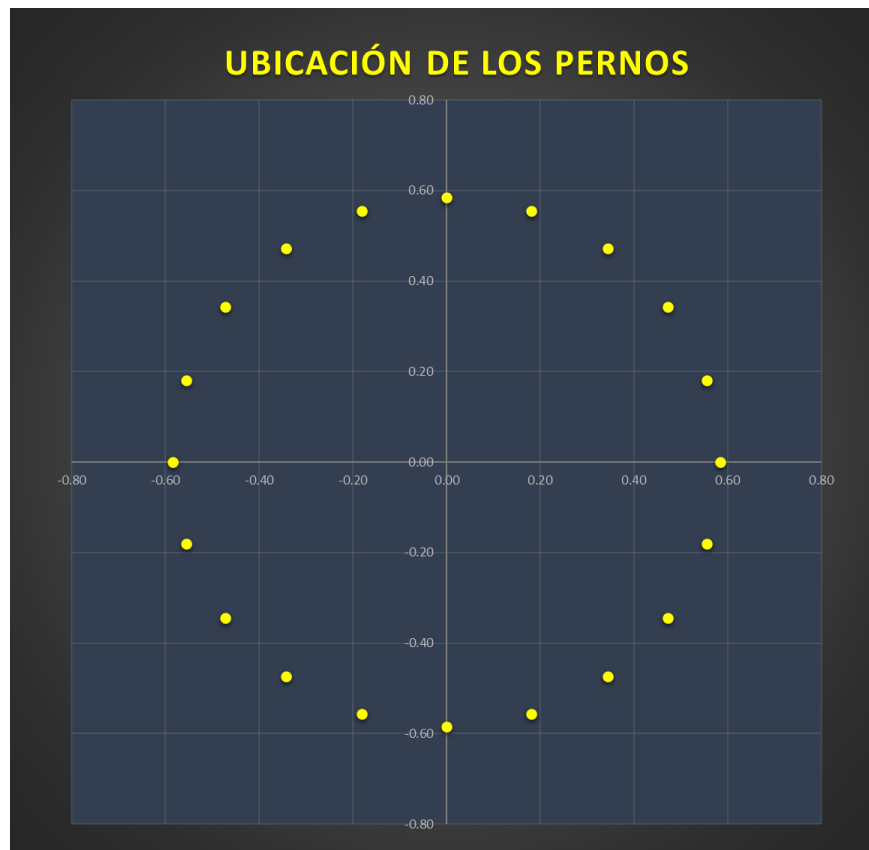


Imagen 35 Ubicación de los pernos para determinar la inercia del conjunto, Tomado de: archivo propio

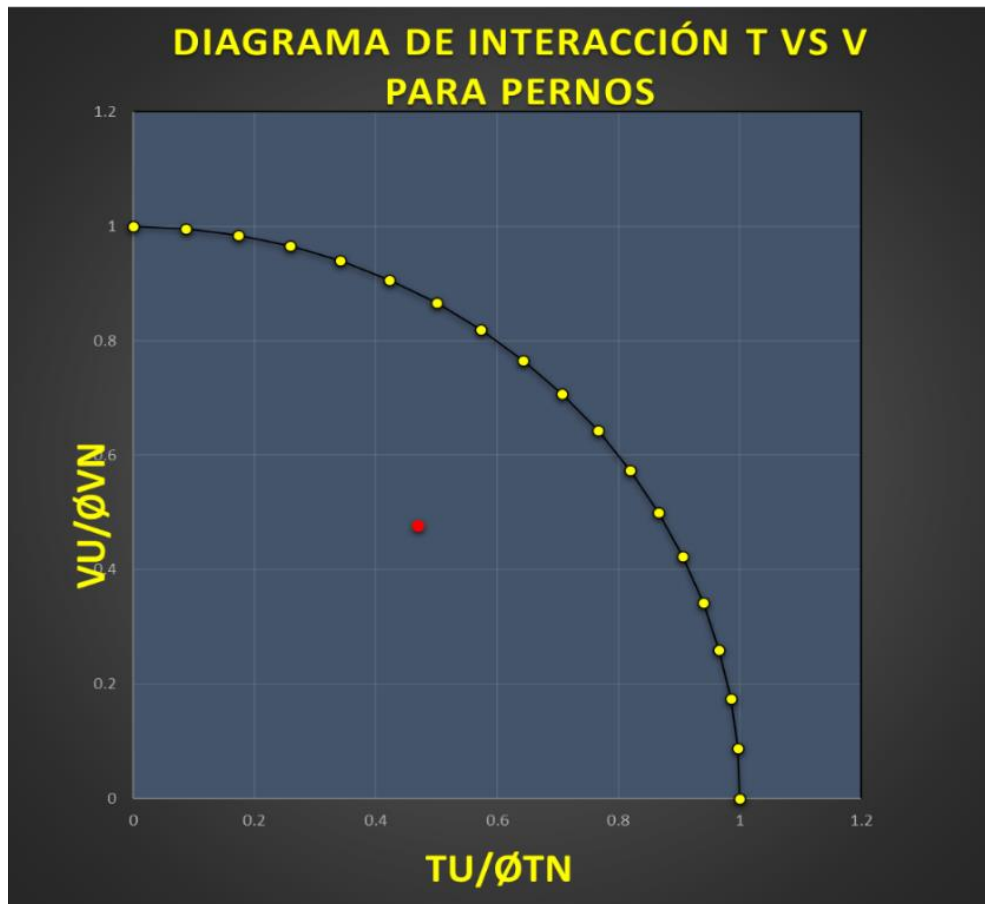


Imagen 36 diagrama de interacción basado en la carga última a tracción última y cortante última de los pernos, Tomado de: archivo propio

El uso del diagrama de interacción permite observar la capacidad de los pernos de 5/8 de pulgada que pueden soportar las cargas que llegan a la brida número 1 del monopolo 18 metros de altura ubicado en la vía Medellín Río negro. Esto se ve representado por el punto rojo que representa la posición a partir de la relación de los porcentajes de capacidad y carga última y que no supera la frontera marcada por el círculo unitario que representa el ciento por ciento de la capacidad teórica de un perno bajo efectos combinados de tensión y cortante.

Es importante resaltar que a medida que se disminuye el diámetro de los pernos más cerca estará del valor límite en el diagrama de interacción, por lo que muchas veces el diseñador suele dimensionar los pernos para que soporten esfuerzos más allá de la frontera de este diagrama.

RIGIDIZADOR		
Es =	200000.00	MPa
Fy =	240.00	MPa
Pu=	59.43	kN
h=	120.00	mm
Ancho=	63.5	mm
t=	6.35	mm
ØPn=	87.10	kN
%Usq=	68%	
SOLDADURA		
t=	3.40	mm

PLATINA			MOMENTOS DE EMPOTRAMIENTO			CAPACIDAD		
Es =	200000.00	MPa	L=	0.092	m	ØMp=	1.30	kN*m
Fy =	250.00	MPa	Memp, Mu	0.682	kN*m	ØMy=	0.86	kN*m
Fu =	450.00	MPa	Vu=	29.71	kN	ØMn=	0.86	kN*m
Ø EXT =	635.00	mm	t=	19.05	mm	ØVn=	163.31	kN
Ø INT =	508.00	mm	Z=	5761.08	mm ³	% Uso	79%	cumple
			I=	36582.84	mm ⁴			
			S=	3840.72	mm ³			

BRIDA Ø635 x 19.05 con 20 PERNOS Ø15.875 & 20 RIGIDIZADORES de120mm x63.5mm x 6.35 mm		
--	--	--

Imagen 37 Chequeo de capacidades de los rigidizadores, brida y diseño propuesto de la conexión por la hoja de cálculo, Tomado de: archivo propio.

Si el diámetro de la línea de pernos aumenta aumentará su inercia y por lo tanto los esfuerzos transmitidos a cada perno serán menores. No obstante, mientras mayor sea el diámetro más material se debe utilizar. Como se observa en el cálculo de la resistencia de los rigidizadores la carga última es bastante menor a la resistencia nominal esto se debe a que conservativamente se utilizó todo el espacio que queda entre el tubo y la platina esto quiere decir que podríamos reducir la sección de la cartela hasta alcanzar un porcentaje de uso del 70%

Las dimensiones de la brida propuestas mediante la hoja de cálculo son mayores a las que arroja el programa TNX Tower esto se explica debido a que las secciones se calculan con la componente mayor de las cargas que llegan a los pernos suponiendo que son las mismas que soportan los rigidizadores, no obstante, estas precauciones ayudan a tener un diseño se acerca mucho a las conexiones propuestas por un software de diseño especializado

Este tipo de conexiones no cuentan con mucha bibliografía al respecto por lo tanto se deben analizar los elementos que componen la brida en sistemas estructurales objetos bien estudiados y conocidos para poder aproximarse a la resistencia real de una conexión tipo brida en estructuras de torres monopolo.

6. Conclusiones

- Aunque en este ejemplo implementación no se utilizó el análisis dinámico, se cuenta con herramientas informática que permiten realizar estos análisis sin mayores problemas. Además, según su ubicación, las cargas que predominan en el diseño de la estructura pueden variar entre viento o sismo.
- Al utilizar la normativa así para el cálculo de las cargas de viento se garantiza un buen predimensionamiento de las secciones no solo para este código, sino también Para los requisitos establecidos por la NSR 10 además dependiendo de la ubicación Se debe implementar el análisis dinámico basado en la zona de amenaza sísmica en que se encuentre
- Es común en la fabricación de monopolos fabricar secciones tubulares a partir de láminas de diferentes espesores para garantizar una correcta relación ancho espesor estipulada por la NSR 10.
- Cómo se mencionó en el trabajo el alcance era diseñar la conexione De los monopolos, sin embargo, el trabajo del análisis estructural es necesario para entregar un diseño final de este tipo de estructuras. Además, un correcto diseño de las conexiones brinda suficiente estabilidad a la estructura.
- Al comparar los diseños que arrojan La herramienta de cálculo propuesta y el programa TNX Tower vale la pena preguntarse sí con la introducción de esta metodología de diseño se pueden ahorrar inversiones en licencias de este tipo de software especializados para el diseño de bridas y monopolos.
- Entre las futuras actualizaciones que se proponen para la hoja de cálculo se encuentra el mejoramiento de la interfaz para un mejor y más fácil uso de ella, también se debe analizar el comportamiento de la soldadura y general o implementar más cargas actuantes en el caso de que la sección No fuera una figura completamente simétrica.
- La clave para llegar a estos resultados fue suponer una viga doblemente empotrada entre dos rigidizadores consecutivos con este principio sí propone una metodología en la que se analiza cada elemento en particular qué puede ser útil para el diseño de estas conexiones

7. Referencias bibliográficas

- American Society of Civil Engineers 7 (ASCE). (2018). ASCE Standards. Recuperado de: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/asce7>
- Acesco. (2020). Productos. Ficha técnica tubería estructural. Recuperado de: <https://www.acesco.com.co/descargas/fichastecnicas/ficha-tecnica-metaltub.pdf>
- Acesco. (2020). Productos. Rollos y láminas. Recuperado de: <https://acesco.com.pr/rollos-laminas/>
- Arias, A.F., González, N.A (2019). Guía de diseño estructural de torres de telecomunicaciones autoportadas en Colombia para alturas de 20, 30 y 40 metros. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad católica de Colombia. Recuperado de: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24353/1/GUIA%20DE%20DISE%20c3%91O%20ESTRUCTURAL%20DE%20TORRES%20DE%20TELECOMUNICACIONES.pdf>
- Bentley Communities. (2020). Products. Recuperado de: https://communities.bentley.com/products/ram-staad/w/structural_analysis_and_design__wiki/24487/ram-connection-connection-v11-0-release-notes
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2007). Comentarios al código sísmico de Costa Rica 2002. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Computers & Structures.INC -CSI-. (2020). Software Products. Recuperado de: <https://www.csiamerica.com/products>
- Estrada, M. (2016). Análisis estructural básico: Apuntes de clase. Universidad Piloto de Colombia. Digiprint Editores SAS.
- Ferrosplanes. (2017). El perfil tubular en la construcción. Obtenido de: <https://ferrosplanes.com/perfil-tubular-construccion/>
- García, A. (2012). Antenas verticales para bajas frecuencias (MF Y HF). Marcombo Ediciones Técnicas.
- Gutiérrez, K.C. (2015). Análisis de una torre de telecomunicaciones atirantada ante los efectos de viento: relación del costo de la torre en función de la velocidad del viento. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de:

http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/7514/1/Tesis%20definitiva_KAREN_rev_APE.pdf>

Hernández Sampieri, R., Fernández y Baptista (2014). Metodología de la investigación. 6ª ed. México: MacGraw Hill

Hernández Sampieri, R., y Mendoza C.P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. México: Mc-Graw Hill Interamericana editores S.A.

INSTALCOM S.A.S. (2015). INSTALCOM. Recuperado el 2 de Marzo de 2020, de ESTRUCTURAS METÁLICAS: <https://www.instalcomsas.com>

Lagos, C. D., y Sánchez, J. H. (2019). Comportamiento a flexión de conexiones apernadas tipo Brida en estructuras de telecomunicaciones tipo monopolo, empleando el método de elementos finitos y validación con prototipo a escala. Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Recuperado de < <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30152>>

McCormac, J. Csernak, S (2013). Diseño de estructuras de acero. Quinta edición, ALFAOMEGA grupo editor S.A.

Menéndez, C. (2019). *Metodología de la intervención social*. Ediciones paraninfo. S.A

Midas Engineering software. (2020). Building Structures Products. Recuperado de <https://en.midasuser.com/>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial. (2010). Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. En L. 4. 1997, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente* (pág. 186). Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS).

Montoya, J.O. (2018). Elementos de concreto reforzado II. Universidad de Ibagué. Ediciones Unibagué

Packer, J., Sherman, D., y Lecce, M. (2010). Guide No. 24 Hollow Structural Section Connections. American Institute of Steel Construction.

RAE (2020). Recuperado de: <https://dle.rae.es/brida>

Steel Construction Manual. (2013). American Institute of Steel Construction (AISC).

Tower Numerics. (2020). Products. Recuperado de: https://www.townrx.com/p_tower.html

Villeta, J. (2000). Diseño de proyectos de ingeniería. Instituto Tecnológico de Santo Domingo. Editora Búho.

Willibald, S. (2003). Design Recommendations for Bolted Rectangular HSS Flange-Plate Connections in Axial Tension. ENGINEERING JOURNAL / FIRST QUARTER, 10.